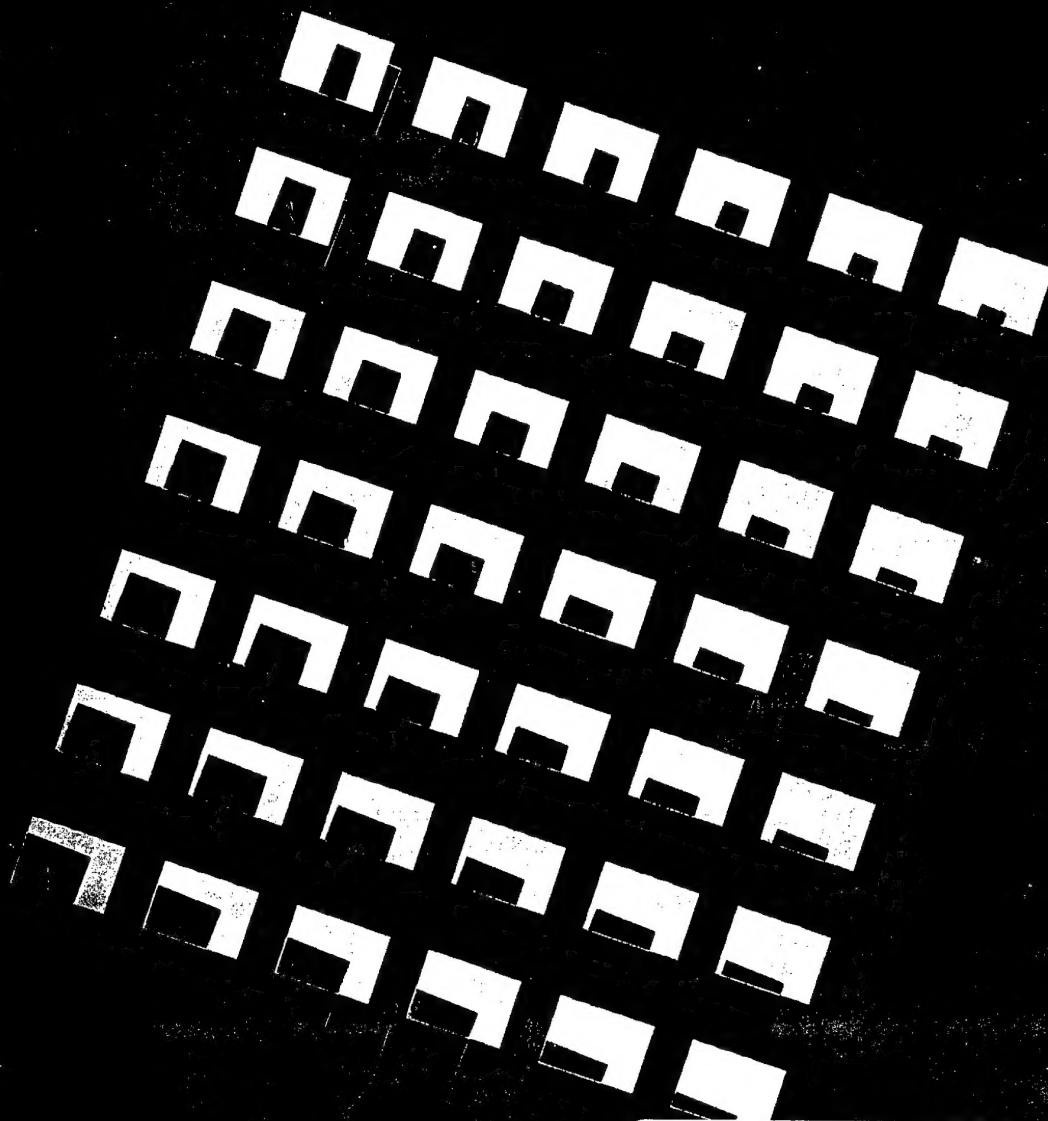


TNO-rapport
PML 1995-A77

Literatuurstudie naar lichte
constructiematerialen voor toepassing
in de beschermingskunde

TNO Prins Maurits Laboratorium



DISTRIBUTION STATEMENT A

Approved for public release;
Distribution Unlimited



19960906 024

TNO-rapport
PML 1995-A77

**Literatuurstudie naar lichte
constructiematerialen voor toepassing
in de beschermingskunde**

TNO Prins Maurits Laboratorium

Lange Kleiweg 137
Postbus 45
2280 AA Rijswijk

Telefoon 015 284 28 42
Fax 015 284 39 58

Datum
juli 1996

Auteur(s)
Ir. J.C.A.M. van Doormaal

Rubricering
Vastgesteld door : Ir. D. Boon
Vastgesteld d.d. : 5 juli 1996
(deze rubricering wijzigt niet)

Titel : Ongerubriceerd
Managementuittreksel : Ongerubriceerd
Samenvatting : Ongerubriceerd
Rapporttekst : Ongerubriceerd

Alle rechten voorbehouden.
Niets uit deze uitgave mag worden
vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt
door middel van druk, fotokopie, microfilm
of op welke andere wijze dan ook, zonder
voorafgaande toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd
uitgebracht, wordt voor de rechten en
verplichtingen van opdrachtgever en
opdrachtnemer verwezen naar de
Algemene Voorwaarden voor Onderzoeks-
opdrachten aan TNO, dan wel de
betreffende terzake tussen partijen
gesloten overeenkomst.
Het ter inzage geven van het TNO-rapport
aan direct belanghebbenden is toegestaan.

Exemplaar nr. : 14
Oplage : 26
Aantal pagina's : 44 (excl. RDP & distributielijst)
Aantal bijlagen : -

© 1995 TNO

DTIC QUALITY INSPECTED 2

TNO Prins Maurits Laboratorium is onderdeel
van de hoofdgroep TNO-Defensieonderzoek
waartoe verder behoren:

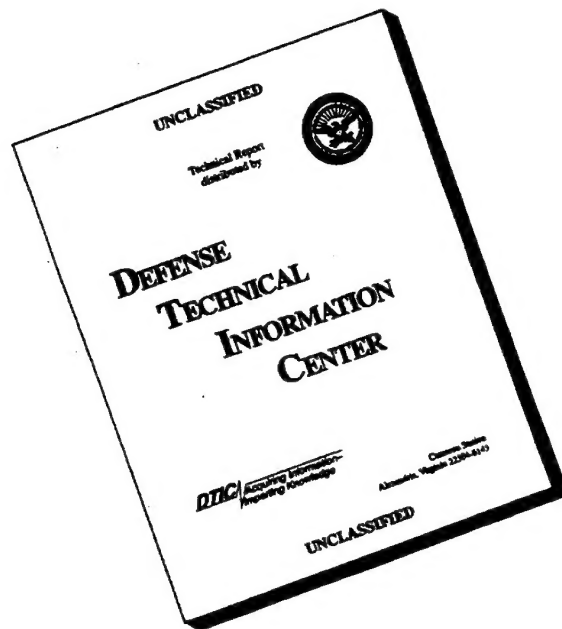
TNO Fysisch en Elektronisch Laboratorium
TNO Technische Menskunde



DISTRIBUTION STATEMENT 4
Approved for public release;
Distribution Unlimited

Nederlandse Organisatie voor toegepast-
natuurwetenschappelijk onderzoek TNO

DISCLAIMER NOTICE



THIS DOCUMENT IS BEST QUALITY AVAILABLE. THE COPY FURNISHED TO DTIC CONTAINED A SIGNIFICANT NUMBER OF PAGES WHICH DO NOT REPRODUCE LEGIBLY.

Managementuittreksel

Titel : Literatuurstudie naar lichte constructiematerialen voor toepassing in de beschermingskunde
Auteur(s) : Ir. J.C.A.M. van Doormaal
Datum : juli 1996
Opdrachtnr. : A93/D/435
Rapportnr. : PML 1995-A77

Op verzoek van MvDef/DGW&T/AWOO is een literatuuronderzoek uitgevoerd naar lichte constructiematerialen, welke mogelijk geschikt zijn voor toepassing in de beschermingskunde.

Deze verkenning van constructiematerialen is onderdeel van een groter project, waarin de beschermingsconstructies in out-of-area operaties centraal staan. Voor dergelijke out-of-area operaties, waarvoor de krijgsmacht tegenwoordig steeds vaker wordt ingezet, worden andere eisen aan beschermingsconstructies gesteld dan voorheen. De beschermingsconstructies zijn niet permanent, moeten snel opgebouwd kunnen worden en eventueel verplaatst of weer afgebroken worden. Voor dergelijke constructies wordt zoveel mogelijk gebruik gemaakt van ter plaatse aanwezige materialen, bijvoorbeeld zand. Voor de basis moeten echter materialen worden aangenomen. Vanwege dit transport is het gewenst dat de constructiematerialen licht en makkelijk hanteerbaar zijn.

Het doel van het literatuuronderzoek is inzicht te verkrijgen in wat er op het gebied van lichte materialen op de markt aanwezig is en lichte materialen te vinden die mogelijk geschikt zijn voor toepassing in beschermingsconstructies.

De hoeveelheid lichte materialen is talrijk. Een compleet overzicht van alle materialen is daarom niet mogelijk. En ook niet alle relevante eigenschappen van de materialen zijn altijd bekend. De dynamische eigenschappen zijn bijvoorbeeld niet altijd onderzocht omdat deze voor andere toepassingen niet van belang zijn.

De materialen zijn ingedeeld in een viertal categorieën:

- lichte metalen;
- keramieken;
- kunststoffen;
- composieten.

Binnen iedere categorie vertonen de materialen soortgelijk gedrag. Per categorie is de geschiktheid voor toepassing in beschermingsconstructies bekeken, hoewel er natuurlijk onderlinge verschillen zijn tussen verschillende materialen binnen een categorie.

Metalen zijn geschikt voor toepassing in beschermingsconstructies vanwege hun ductiliteit en redelijke sterkte en stijfheid. Zowel de bescherming tegen blast als

tegen ballistische dreiging is redelijk. Aluminium wordt van de lichte metalen het meest toegepast.

Keramiëken bieden een zeer goede ballistische bescherming maar kunnen niet als dragende constructie-onderdelen gebruikt worden. Een combinatie met metaal of kunststof is nodig.

Binnen de grote groep van kunststoffen is er een aantal dat een goed schokabsorberend vermogen heeft. De vezelversterkte kunststoffen lijken veelbelovende materialen die een hoge sterkte en stijfheid combineren met een redelijke ballistische weerstand.

Onder composieten valt een grote diversiteit aan combinaties van materialen van de andere drie categorieën. Door de combinatie van twee of meer materialen worden de gunstige eigenschappen van ieder materiaal afzonderlijk verenigd in een samengesteld materiaal. Binnen deze groep is daarom wel een aantal materialen aan te wijzen dat zeer goede beschermingseigenschappen in zich draagt. De specifiek voor beschermingsdoeleinden ontwikkelde pantsermaterialen vallen bijvoorbeeld onder deze categorie.

Het literatuuronderzoek heeft inzicht gegeven in de verschillende typen lichte materialen, metalen, kunststoffen, keramiëken en diverse composieten, en in de specifiek gunstige of ongunstige eigenschappen van deze type materialen voor toepassing in de beschermingskunde.

Het is niet mogelijk om één materiaal als beste of meest geschikte aan te wijzen. De geschiktheid van een materiaal hangt namelijk samen met de gewenste bescherming en andere eisen ten aanzien van de beschermingsconstructie, zoals de snelheid waarmee de constructie op te bouwen en af te breken is of het gebruik van andere middelen, zoals zand. Specifieke eisen zijn echter niet geformuleerd door defensie. Dit onderzoek is meer een algemene verkenning van mogelijke materialen.

Een tweede reden waarom het niet mogelijk is om een bepaald materiaal als beste aan te wijzen is het ontbreken van gegevens over of onderzoeken naar het dynamische gedrag van de materialen. Vele materialen zijn ontwikkeld voor toepassingen onder statische belastingen.

Aanbevolen wordt om de ontwikkelingen op het gebied van nieuwe materialen in de toekomst te blijven volgen. Er zou een soort databank opgezet kunnen worden, waaruit voor specifieke eisen het meest geschikte materiaal gezocht kan worden. Een dergelijke databank dient ook gegevens te bevatten over het dynamische gedrag van de materialen. Hiaten in deze kennis dienen opgevuld te worden. Daarom wordt aanbevolen om een aantal veelbelovende materialen te testen op blast- en impact-bestendigheid om specifieke problemen voor deze type materialen aan het licht te brengen alsmede de eisen te formuleren.

Een laatste punt van aanbeveling betreft niet de keuze van een materiaal voor een beschermingsconstructie maar de constructieve aspecten. Ook aan deze aspecten moet voldoende aandacht besteed worden.

Samenvatting

Op verzoek van MvDef/DGW&T is een literatuuronderzoek uitgevoerd naar lichte constructiematerialen, welke mogelijk geschikt zijn voor toepassing in de beschermingskunde. In het kader van hedendaagse out-of-area operaties bestaat vanuit de krijgsmacht belangstelling voor lichte materialen in verband met transport.

De eigenschappen van lichte metalen, keramieken, kunststoffen en composieten zijn beschouwd. Het is niet mogelijk om een materiaal aan te wijzen dat het meest geschikt is. Ieder materiaal heeft zijn specifieke positieve en negatieve eigenschappen. De geschiktheid van een materiaal hangt af van de specifieke eisen, die men stelt. Het ontbreekt echter aan deze informatie.

Aanbevolen wordt om de ontwikkelingen op het gebied van lichte materialen te blijven volgen en om hiaten in kennis over het dynamisch gedrag van veelbelovende materialen op te vullen door ze op blast en impact te testen. Tevens wordt aanbevolen om niet alleen aandacht te besteden aan de keuze van een goed materiaal, maar ook aan constructieve aspecten zoals verbindingen.

Inhoud

Managementuittreksel	2
Samenvatting	4
1 Inleiding	6
2 Lichte metalen	8
2.1 Metalen en hun legeringen.....	8
2.2 Metaal-matrix-composieten (MMC's).....	12
3 Keramieken	15
4 Kunststoffen	18
4.1 Polymeren	18
4.2 Vezelversterkte kunststoffen	20
5 Composieten.....	30
5.1 Pantsermaterialen.....	30
5.2 Composieten van metaal en kunststof	31
6 Conclusies	33
7 Referenties.....	36
8 Ondertekening	44

1 Inleiding

Op verzoek van MvDef/DGW&T/AWOO is een literatuuronderzoek uitgevoerd naar lichte constructiematerialen, welke mogelijk geschikt zijn voor toepassing in de beschermingskunde.

De taken van de krijgsmacht zijn veranderd. Zij wordt steeds meer ingezet voor vredesoperaties. Voor dergelijke out-of-area operaties worden andere eisen aan beschermingsconstructies gesteld dan voorheen. De dreiging is anders, maar ook logistieke aspecten, bouwtijd en kostprijs zijn belangrijke factoren in de keuze voor een bepaalde beschermingsconstructie. De beschermingsconstructies zijn bijvoorbeeld niet permanent. Ze moeten snel opgebouwd kunnen worden en eventueel verplaatst of weer afgebroken. Hoewel er zoveel mogelijk gebruik zal worden gemaakt van ter plaatse aanwezige materialen, zullen altijd essentiële materialen/constructieonderdelen meegenomen moeten worden. Vanwege dit transport is het gewenst dat de constructiematerialen licht en makkelijk hanteerbaar zijn.

Om in de toekomst beter in te kunnen spelen op vragen ten aanzien van de bescherming in out-of-area operaties is bij TNO Prins Maurits Laboratorium (TNO-PML) op verzoek van MvDef/DGW&T/AWOO een aantal projecten parallel opgestart. Deze projecten betreffen zowel een verkenning van de behoeftestelling als een verkenning van de mogelijkheden voor constructies.

In dit kader is ook dit literatuuronderzoek te plaatsen, dat als doel heeft inzicht te krijgen in wat er op het gebied van lichte materialen op de markt aanwezig is en lichte materialen te vinden die mogelijk geschikt zijn voor toepassing in beschermingsconstructies.

De ontwikkelingen op het gebied van lichte materialen zijn veelvuldig. Met name in de vliegtuigbouw en ruimtevaarttechnologie, waar zowel massa als sterkte-eigenschappen erg belangrijk zijn, wordt veel onderzoek gedaan naar nieuwe lichte constructiematerialen. De ontwikkelingen en onderzoeken zijn zo talrijk en de literatuur is zo omvangrijk dat het onmogelijk is compleet te zijn in dit literatuuronderzoek. Het is zelfs eerder een probleem om een weg te vinden in de vele literatuur. Een zoekopdracht leverde een onmogelijk lange lijst met publicaties op. Om het overzicht te behouden zijn de materialen hier ingedeeld in een viertal categorieën, te weten:

- lichte metalen;
- keramieken;
- kunststoffen;
- composieten.

Binnen iedere categorie wordt voor een aantal materialen de relevante eigenschappen gegeven, voor zover bekend. Deze materialen geven een beeld van de eigenschappen van materialen in de betreffende categorie.

De toepasbaarheid van een materiaal hangt af van de gebruikerseisen en de dreiging waartegen de constructie bescherming moet bieden. Deze eisen zijn nodig om te kunnen beoordelen of een materiaal voldoet of niet. Voor de toepassing die we hier op het oog hebben, beschermingsconstructies in vredesoperaties, liggen de ontwerpisen niet vast. In het algemeen kan echter gesteld worden dat dergelijke constructies bescherming moeten bieden tegen projectielen en schokgolven. Voor die functie zijn de volgende materiaaleigenschappen gunstig:

- 1 grote hardheid om projectieldeformatie en opbreken te veroorzaken;
- 2 grote stijfheid om puntbelasting om te zetten in vlakbelasting of om weerstand te bieden tegen een schokgolf;
- 3 grote taaiheid om kinetische energie van projectiel of van schokgolf om te zetten in plastische deformatie;
- 4 groot elastisch deformatievermogen;
- 5 groot schokabsorberend vermogen / hoge slagsterkte;
- 6 grote opnamecapaciteit van breukenergie in compressie, rek en afschuiving om kinetische energie om te zetten in breukenergie;
- 7 hoge sterkte om hoge (afschuif-) belastingen te weerstaan;
- 8 hoge massa om impuls te weerstaan.

Het concept van hoge massa en dus hoge traagheidskrachten, waarvan voor conventionele constructies (gewapende beton) gebruik werd gemaakt, wordt in dit project verlaten. Als gevolg daarvan moet de lagere massa van lichtere materialen gecompenseerd worden door hogere sterkte, stijfheid of vervormbaarheid.

In de volgende hoofdstukken wordt voor een aantal materialen informatie verstrekt over de bovenstaande mechanische eigenschappen of over een gedeelte daarvan. Niet alle gegevens zijn voor handen.

2 Lichte metalen

2.1 Metalen en hun legeringen

Metalen zijn zeer geschikt als materiaal voor beschermingsconstructies vanwege hun ductiliteit. Door plastische vervorming kunnen metalen veel energie absorberen voordat bezwijken optreedt. Staal wordt vaak gebruikt voor deze doeleinden, mede ook vanwege de lage prijs.

Naast staal worden met name aluminium- en koperlegeringen als constructiemateriaal toegepast. In de lucht- en ruimtevaart vindt men tevens titanium en soms beryllium en hun legeringen als constructiemateriaal.

Van deze genoemde materialen behoren aluminium ($\rho = 2700 \text{ kg/m}^3$), titanium ($\rho = 4540 \text{ kg/m}^3$) en beryllium ($\rho = 1850 \text{ kg/m}^3$) tot de lichte metalen. Ter vergelijking: staal heeft een dichtheid van 7850 kg/m^3 . De meest belangrijke eigenschappen van bovengenoemde metalen worden in tabel 1 vergeleken met die van staal. De sterkte- en vervormingseigenschappen zijn sterk afhankelijk van het type legering. Legeringen met een hoge sterkte hebben in het algemeen een geringere ductiliteit.

Tabel 1: Eigenschappen van staal, aluminium, titanium en beryllium.

Materiaal	Dichtheid [kg/m ³]	E-modulus [GPa]	Vloegrens [MPa]	Treksterkte [MPa]	Toelaatbare rek [%]	Bron
Staal	7850	210				[1]
Fe360B			≥ 195	≥ 355	ca. 24	[1]
Fe510D			≥ 315	≥ 500	ca. 20	[1]
11SMnPb28			≥ 375	465-815	≥ 6	[1]
X6CrNi18 10			≥ 200	490-690	≥ 38	[1]
X14CrS17			≥ 440	690-890	≥ 11	[1]
Aluminium	2700	70				[1]
AlCu6BiPb			≥ 195	≥ 295	≥ 8	[1]
AlMgSi			≥ 160	≥ 215	≥ 10	[1]
AlZn6MgCu			≥ 460	≥ 275	≥ 6	[1]
AlMg3 (zacht)			≥ 75	180-230	≥ 17	[1]
AlMg3 (hard)			≥ 180	245-305	≥ 2	[1]
Al 6082			50-80	200	≥ 15	[2]
Al-Li 8090		92.5	295	428	4.5	[3]
Al 2124		80	272	435	6.7	[3]
				540	17	[12]
AA 2024		72	328	493	23	[4]
Al 6061-T6			200	370	30	[14]
Al 7075-T6			500	700	19	[14]

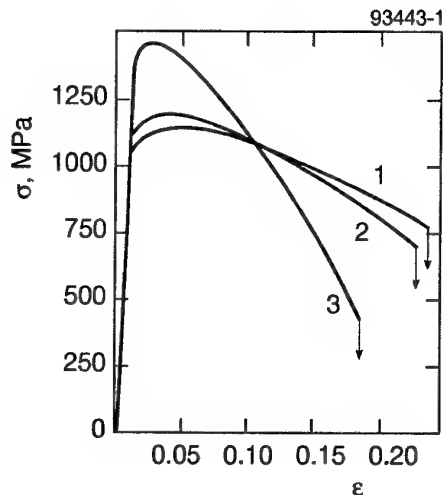
Tabel 1: Vervolg.

Materiaal	Dichtheid [kg/m ³]	E-modulus [GPa]	Vloeigrens [MPa]	Treksterkte [MPa]	Toelaatbare rek [%]	Bron
Titanium	4540	115		≥ 300		[1],[7]
Ti VT16			1090	1106	23.4	[5]
Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn			1060	1280	≥ 10	[6]
Ti-1Al-1Mn				500	ductiel	[7]
Ti-4,5Al-1,2Mn				700	ductiel	[7]
Ti-5Al-2V				700	ductiel	[7]
Ti-6Al-4V				900-950		[7]
Ti-5Al-5V-5Mo-1Cr-1Fe				1050-1200		[7]
Beryllium	1850	300				[1]
S-200 F			260	403	5.1	[8]
Ti-Al-intermetaal						
Ti-23Al-11Nb-0.9Si				1049	16.6	[9]
Ti-24Al-11Nb				626	2.3	[9]
				600		[10]
Ti-25Al-10Nb-3V-1Mo				963-1267	0.5-2.6	[9]
Ti-23Al-9Nb-2Mo-0.9Si				1208	4	[9]
Ti-48Al-2Cr-2Nb				350		[10]

Metalen vertonen een reksnelheidsafhankelijk gedrag. In het algemeen neemt de sterkte toe met de reksnelheid en wordt het materiaal brosser. Maar er zijn ook resultaten bekend van metalen die een ductieler gedrag vertonen bij een hogere reksnelheid. De invloed van de reksnelheid is meestal geringer bij hogere sterkte materialen.

Ter illustratie volgen hier de resultaten van een aantal onderzoeken naar de dynamische eigenschappen van enkele aluminium en titaniumlegeringen.

Popov e.a. [5] hebben statische (reksnelheid = 10^{-3} s^{-1}) en dynamische trekproeven (reksnelheid = 500 s^{-1}) op titanium VT16 uitgevoerd en vergeleken. De gevonden spanning-rek-krommes zijn weergegeven in figuur 1. Een toename van 30% in vloeigrens en in treksterkte werd waargenomen bij een toename in reksnelheid van $1.7 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ tot 510 s^{-1} . In dit zelfde reksnelheidsgebied namen de totale verlenging en breukenergie beide met ongeveer 20% af. De sterkte bij breuk was een factor 1.7 lager in de dynamische proef. Na het bereiken van de maximale sterkte neemt onder dynamische belasting de sterkte sterk af.



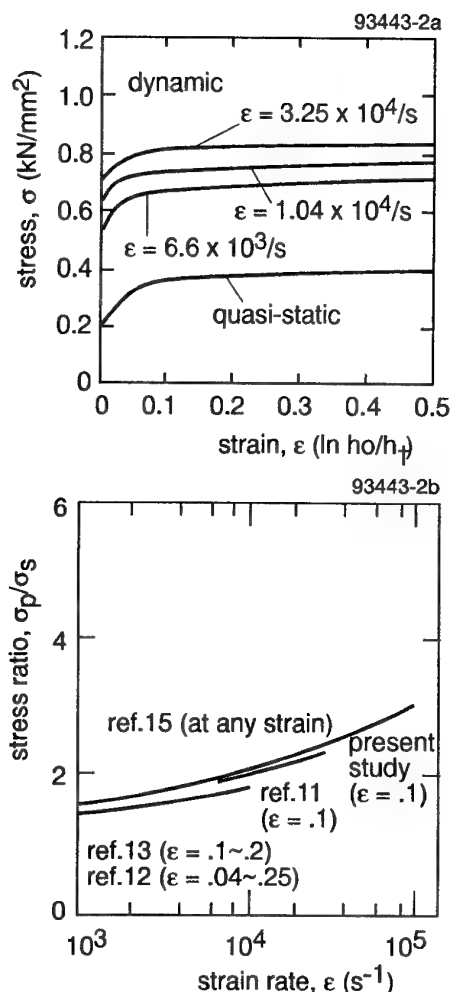
Figuur 1: Spanning-rek kromme van titanium VT16 onder trek [5], 1) $\dot{\epsilon} = 1.7 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$; 2) $\dot{\epsilon} = 2.7 \cdot 10^{-1} \text{ s}^{-1}$; 3) $\dot{\epsilon} = 510 \text{ s}^{-1}$.

Takeda en Koboyashi [6] hebben de invloed van de reksnelheid op de eigenschappen van het beta titanium Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn bekeken door quasi-statische trekproeven (reksnelheid = 10^{-3} s^{-1}) te vergelijken met dynamische trekproeven met een reksnelheid van 10^3 s^{-1} . Ze vonden dat de maximale sterkte toenam met 11%, de maximale verlenging met 40% en de geabsorbeerde energie met 38%. Wat overeenkwam met de resultaten van Popov e.a. [5] is een sterkere afname in sterkte dynamisch dan statisch na de maximale sterkte.

Voor de aluminiumlegering BS 1474 HE 30 TF (samenstelling: Mn 0.55, Si 1.05, Cp 0.006, Ni 0.001, Fe 0.30, Cu 0.01, Mg 0.55, Zn 0.03, Al-Rem) hebben Hashmi en Haque [11] in proeven onder druk een grote gevoeligheid voor de reksnelheid waargenomen. De experimenten waren uitgevoerd met vier verschillende reksnelheden, te weten:

- quasi-statisch;
- $6.6 \cdot 10^3 \text{ s}^{-1}$;
- $1.04 \cdot 10^3 \text{ s}^{-1}$;
- $3.25 \cdot 10^4 \text{ s}^{-1}$.

Een verhouding tussen dynamische en quasi-statische druksterkte van 1.9 tot 2.3 werd waargenomen over een rek van 10% (zie figuur 2).



Figuur 2: a. Dynamische spanning-rek curves voor Aluminium BS 1474 HE 30 TF [11].
b. Rekgevoeligheid van Aluminium BS 1474 HE 30 TF [11].

Fu e.a [12] hebben de invloed van de reksnelheid op Al-2124 legering onder trek bestudeerd. Als resultaat werd gevonden dat de invloed van de reksnelheid in de range van 10^{-2} tot $3 \cdot 10^2 \text{ s}^{-1}$ gering is. De ductiliteit neemt echter sterk toe met de reksnelheid.

Voor Al 6061-T6 en Al 7075-T6 onder druk worden in [14] statische en dynamische (reksnelheden in de orde van $0.5 \cdot 10^3 \text{ s}^{-1}$, $1.5 \cdot 2 \cdot 10^3 \text{ s}^{-1}$ en $5 \cdot 10^3 \text{ s}^{-1}$) spanning-rek-krommes vergeleken. Tot reksnelheden van $2 \cdot 10^2 \text{ s}^{-1}$ is de sterkte ongevoelig voor de reksnelheden. Voor hogere reksnelheden neemt de vloeigrens iets toe. De maximale sterkte neemt niet toe. Naar de invloed van de reksnelheid op de ductiliteit is niet gekeken.

Van de drie hierboven genoemde lichte metalen zijn alleen toepassingen van aluminium in de beschermingskunde bekend, namelijk in pantsermaterialen. Een voorbeeld is de Fokker Armour Panel.

Beryllium, dat de gunstigste stijfheid/massa-verhouding heeft, wordt vermoedelijk niet eens in overweging genomen. Vanwege de schaarsheid van dit metaal zijn de kosten hoog. Verder kan weinig over dit materiaal gezegd worden, omdat maar voor één type legering de mechanische eigenschappen zijn gevonden. Dit type legering heeft een vrij lage ductiliteit. En de sterkte-eigenschappen zijn vergelijkbaar met die van een aantal aluminium-legeringen.

Titanium heeft voor de toepassing in beschermingsconstructies geen specifieke voordelen ten opzichte van aluminium. In aluminium kan lichter geconstrueerd worden vanwege de gunstigere stijfheid/massa-verhouding. Titanium wordt in de lucht- en ruimtevaart veel toegepast omdat het zijn sterkte-eigenschappen ook behoudt bij hoge temperaturen, terwijl de sterkte van aluminium al bij temperaturen hoger dan 125 à 200 °C sterk afneemt. Omdat men in de beschermingskunde niet te maken heeft met dergelijke hoge temperaturen, speelt deze eigenschap van aluminium geen rol.

Een eigenschap van aluminium die misschien nog gunstig is voor de toepassing als materiaal in een beschermingsconstructie in bepaalde milieus is het feit dat op aluminium zich spontaan een zeer harde en dichte laag Al_2O_3 vormt. Door deze laag heeft aluminium een goede corrosievastheid.

2.2 Metaal-matrix-composieten (MMC's)

Behalve door de samenstelling van een legering aan te passen kunnen de eigenschappen van metalen ook verbeterd/gewijzigd worden door deeltjes keramiek (bijvoorbeeld SiC) toe te voegen. Deze zogenaamde metaal-matrix-composieten (MMC's) hebben een hogere E-modulus, een hogere sterkte en een betere slijta-geweerstand, zoals tabel 2 met de eigenschappen van een aantal MMC's en bijbehorende legeringen laat zien. De ductiliteit neemt echter af door het toevoegen van deeltjes keramiek. Tabel 2 laat dit ook zien. Gegevens over de dichtheden worden in de beschouwde literatuur niet gegeven. De dichtheid is waarschijnlijk in dezelfde orde als die van het zuivere metaal of legering. Dit hangt af van de hoeveelheid en soort keramiek-deeltjes.

Toepassing van MMC's vindt plaats in de lucht- en ruimtevaart en in de automobielindustrie dankzij de goede sterkte- en stijfheidseigenschappen. Er bestaat ook belangstelling vanuit de beschermingskunde in verband met een vermoedelijk gunstige ballistische weerstand.

Tabel 2: *Mechanische eigenschappen van enkele MMC's en bijbehorende legeringen.*

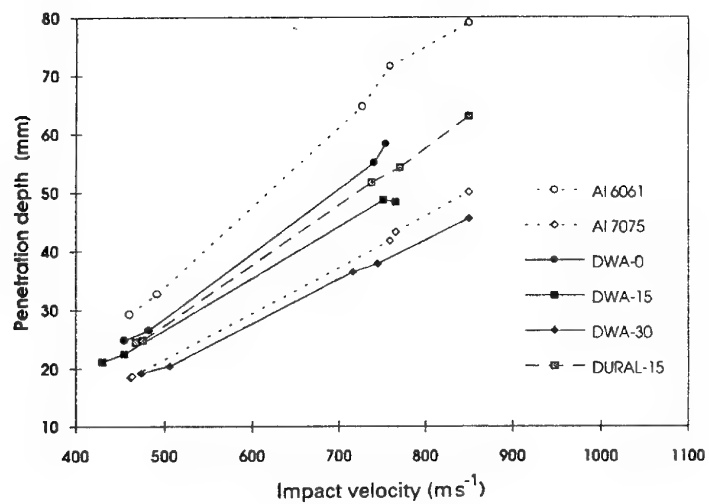
Materiaal	E-modulus [GPa]	Vloeigrens [MPa]	Treksterkte [MPa]	Toelaatbare rek [%]	Bron
Al-Li 8090					[3]
legering	92.5	295	428	4.5	
MMC	114.0	370	575	4.0	
Al2124					[3]
legering	80	272	435	6.7	
MMC	109.6	392	622	4.9	
AA2024	72	328	493	23	[4]
2024/SiC/20p	103	393	620	6	
N202/SiC/17p	103	388	573	7	
2124/SiC/20p	97	446	605	4	[4]
7457/SiC/19p	98	466	591	3	[4]
Al 2124			540	17	[12]
2124/SiC _p (15µm)/20p			572	10	
Al2124/SiC _p (3µm)/17p	99	440	610	12	[13]
Al 6061-T6		200	370	30	[14]
Al6061-T6/SiC _D /0%		325	490	30	
Al6061-T6/SiC _D /15%		360	590	27	
Al6061-T6/SiC _p /30%		370	625	22.5	

Over de invloed van de reksnelheid op de materiaaleigenschappen van MMC's zijn slechts enkele publicaties gevonden, op basis waarvan geen algemene conclusie mag worden getrokken.

In [12] wordt gerapporteerd over de invloed van de reksnelheid op Al2124/SiC_p(15µm)/20p onder trek. De sterkte van het materiaal bleek vrij ongevoelig voor de reksnelheid. De ductiliteit nam aanzienlijk toe met de reksnelheid. Eveneens een toename in ductiliteit voor een met SiC_p-deeltjes versterkt Al 2124, maar dan onder druk, werd waargenomen door Luo e.a. [13]. Deze onderzoekers zeggen niets over de invloed van de reksnelheid op de sterkte.

In [14] wordt geconstateerd dat de invloed van de reksnelheid groter is op de MMC's (met SiC-deeltjes versterkte Al 6061-T6) dan op het basismateriaal. De vloeigrens onder druk wordt hoger bij hogere belastingsnelheden. De maximale druksterkte neemt echter nauwelijks toe. De ductiliteit is niet beschouwd in dit onderzoek.

Op basis van de hogere E-modulus en hogere sterkte is een verbeterde ballistische weerstand van de MMC's te verwachten. Voor met deeltjes versterkt Al 6061-T6 is dit door Vaziri e.a. [14] ook waargenomen. De resultaten van hun onderzoek worden samengevat in figuur 3. Hierin wordt de penetratie-diepte in Al 6061 vergeleken met die in het met Al₂O₃-deeltjes (Dural) of SiC-deeltjes (DWA) versterkte materiaal. Ter vergelijking is ook een hoge sterkte-aluminium (Al 7075) beschouwd.



Figuur 3: Penetratie-diepte als functie van impact snelheid voor Al 6061 en Al 7075 en enkele MMC's [14].

3 Keramieken

Keramieken hebben in het algemeen een hoge hardheid en een grote stijfheid (zie tabel 3). Vanwege deze eigenschappen leveren keramieken een goede ballistische weerstand. De grote hardheid veroorzaakt projectiel deformatie en opbreken. Door de grote stijfheid wordt de puntbelasting van een projectiel verspreid over een groter oppervlak.

Nadeel van keramische materialen is hun brosheid en relatief lage treksterkte. Ze moeten daarom gebruikt worden in combinatie met een onderlaag van metaal of kunststof.

Enkele keramische materialen die gebruikt worden voor ballistische bescherming en hun relevante mechanische eigenschappen worden gegeven in tabel 3. Door variatie in porositeit variëren ook de dichtheid en de mechanische eigenschappen van keramieken.

Tabel 3: Eigenschappen van keramieken.

	dichtheid [kg/m ³]	elasticiteits- modulus [GPa]	hardheid [GPa]	treksterkte [MPa]	druksterkte [MPa]	referentie
Al ₂ O ₃	3900	370	18-23	280	2400	[1], [15]
85%	3430	224	8.8		2175	[18]
90%	3580	268	10.6		2345	[18]
96%	3740	310	12.3		2660	[18]
99.5%	3900	383	15		2785	[18]
AlN	3230	202				[17]
SiC	2880	354	20-30			[16]
	3110	391		159	2200	[16], [15]
	3150	441		182		[16]
Si ₃ N ₄	3150	220-310	8-19	200	2500	[1], [15]
BeO	3030	400	-	400		[1]
B ₄ C	2520	450	29			[1]
TiB ₂	4490	238				[17]
	4520	414	27.0		5700	[18]
	4520	538	26.1		6000	[18]
ZrO ₂	5720	205	11.2		1900	[18]

Een aantal onderzoeken naar de invloed van de reksnelheid op de mechanische eigenschappen duiden op een behoorlijke invloed van de reksnelheid op de sterkte-eigenschappen van keramieken. De invloed van de reksnelheid is niet eenduidig. Gilat [19] concludeerde op basis van torsieproeven volgens het Hopkinson Bar principe dat de afschuifsterkte van zowel aluminiumoxide als titaniumboride toeneemt met de reksnelheid. Een voorbehoud ten aanzien van deze conclusie wordt echter gemaakt vanwege het feit dat de quasi-statische referentie-gegevens onder een ander type belasting waren verkregen.

Kobayashi en Daimaruya [20] hebben voor Mullite keramiek (53 gew.% Al₂O₃ en 41 gew.% SiO₂) een toename waargenomen in de dynamische breuksterkte met

een factor van ongeveer 1.6 ten opzichte van de statische breuksterkte. Geen invloed van de reksnelheid op de elasticiteitsmodulus werd waargenomen. Rodriguez e.a. [21] hebben statische (belastingsnelheid 0.1 MPa/s) en dynamische (belastingsnelheid 10^6 MPa/s) splijtproeven uitgevoerd op een SiC-NSi-mengsel en op een aluminiumoxide. Uit deze proeven zijn de treksterktes afgeleid. Voor het SiC-NSi-mengsel is een toename in treksterkte bij een hoger belastingsnelheid waargenomen (van 70 naar 90 MPa), terwijl voor het Al_2O_3 de dynamische treksterkte (190 MPa) lager was dan de statische (250 MPa).

Keramieken zijn bekend om hun goede ballistische weerstand. Door een laag keramiek op een metalen ondergrond te bevestigen neemt de penetratie aanzienlijk af. In [18] bijvoorbeeld vergelijken Woodward e.a. de penetratiediepte in aluminium met en zonder een keramische laag. Diverse keramische materialen zijn gebruikt. De configuratie van de met keramiek versterkte doelwitten was als volgt: op een ondergrond van 5083 H115 aluminium is een laag van 12.7 mm keramiek bevestigd, met daarvoor weer een dunne laag aluminium (6.35 mm 2024 T351) om het keramiek op te sluiten. De resultaten zijn samengevat in tabel 4. Met name in geval van een puntig projectiel is de ballistische effectiviteit van het keramiek groot. Deze ballistische effectiviteit is gedefinieerd als

$$\eta = \frac{\rho_{Al} \cdot \Delta h_{Al}}{\rho_c \cdot h_c} \quad (1)$$

waarin η de effectiviteit, ρ_{Al} en ρ_c de dichtheid van respectievelijk het aluminium en het keramiek, h_c de dikte van het keramiek en Δh_{Al} de reductie in penetratiediepte in aluminium ten gevolge van het keramiek.

Tabel 4: Penetratie in aluminium met en zonder een laag keramiek [18].

Materiaal	Projectiel	Penetratie diepte (in aluminium ondergrond) [mm]	Ballistische effectiviteit η	Opmerkingen
Aluminium	Puntig,	265.0	-	
Glass	7.72 diameter,	200.0	4.2	
AD85	23.2 g,	122.0	8.6	
AD995	impact snelheid =	50.0	11.7	
Zirconia	1209 m.s^{-1} ,	68.0	9.3	10 mm i.p.v. 12.7
TiB ₂ (Ceradyne)	conische hoek: 30°	38.0	11.1	
Aluminium	Vlak, 19.9 g,	75.0	-	
Glass	snelheid: 1243 m.s^{-1} ,	46.0	1.6	
Zirconia	6.6 mm diameter	42.0	1.3	10 mm i.p.v. 12.7

Een vergelijking tussen de verschillende soorten keramiek laat zien dat op basis van massa het aluminiumoxide met hoge dichtheid het beste presteert. Titaniumdiboride heeft een vergelijkbare prestatie. Wat minder effectief zijn het aluminiumoxide met een lage dichtheid en zirconia.

Nahme e.a. [22] vergelijken ook op basis van massa de effectiviteit van enkele keramieken, te weten Si_3N_4 met twee verschillende dichtheden (2290 kg/m^3 en

3150 kg/m³), TiB₂ en Al₂O₃. De penetratie in het achterliggende staal was het kleinst in TiB₂ en het grootst in Al₂O₃. Van de twee Si₃N₄-keramieken is degene met de hoogste dichtheid iets beter. Omdat in [22] de dichtheden van TiB₂ en Al₂O₃ niet worden gegeven kan niet vastgesteld worden of de resultaten in tegenpraak zijn met die van Woodward e.a. [18].

Ernst e.a. [23] kwamen wat betreft toenemende ballistische effectiviteit in overeenstemming met vergelijking (1) tot de volgorde van Al₂O₃, TiB₂ en B₄C. B₄C was beduidend beter dan de andere twee materialen. De ballistische effectiviteit van Al₂O₃ en van TiB₂ lag niet ver uit elkaar.

De bescherming van keramiek is slechts eenmalig. Ten gevolge van impact verbrijzelt het keramiek of laten de tegels los. Als oplossing voor multi-hit eisen worden daarom relatief kleine tegels gebruikt [24], zodat de kans dat een tegel twee maal geraakt wordt miniem is. Nadeel hiervan is dat de kans op inslag op randen en hoeken van tegels toeneemt. Opdat de bescherming toch voldoende is moeten dikkere tegels gebruikt worden, waardoor de massa toeneemt en dus ook de kostprijs, welke toch al niet gering is. Een andere optie om de prestaties van keramiek in dit opzicht te verbeteren, is het (frontaal en lateraal) opsluiten van keramiek. De invloed van het opsluiten op de ballistische weerstand is onderwerp van onderzoek (bijvoorbeeld [23]).

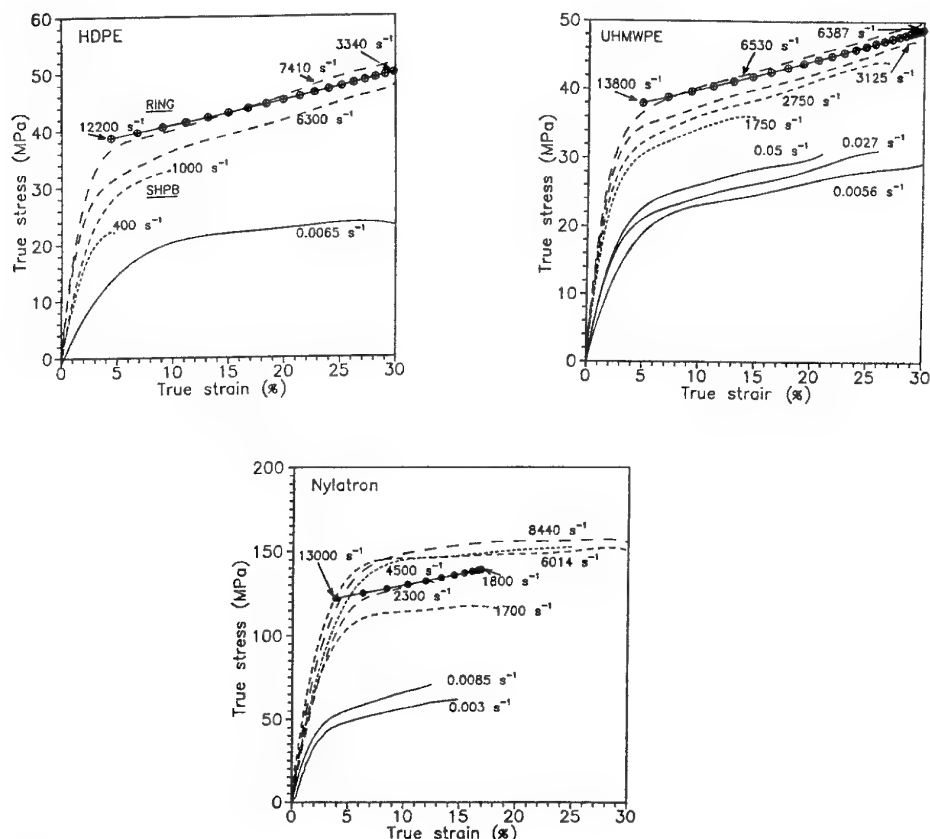
4 Kunststoffen

4.1 Polymeren

De grootste groep lichte materialen betreft de kunststoffen. Er zijn vele soorten kunststoffen op de markt en de ontwikkelingen zijn zeer talrijk. Door wijzigingen in de ketens van de moleculen, door combinatie van verschillende kunststoffen (blending) of door het richten van de lange ketens kunnen de materiaaleigenschappen gewijzigd worden.

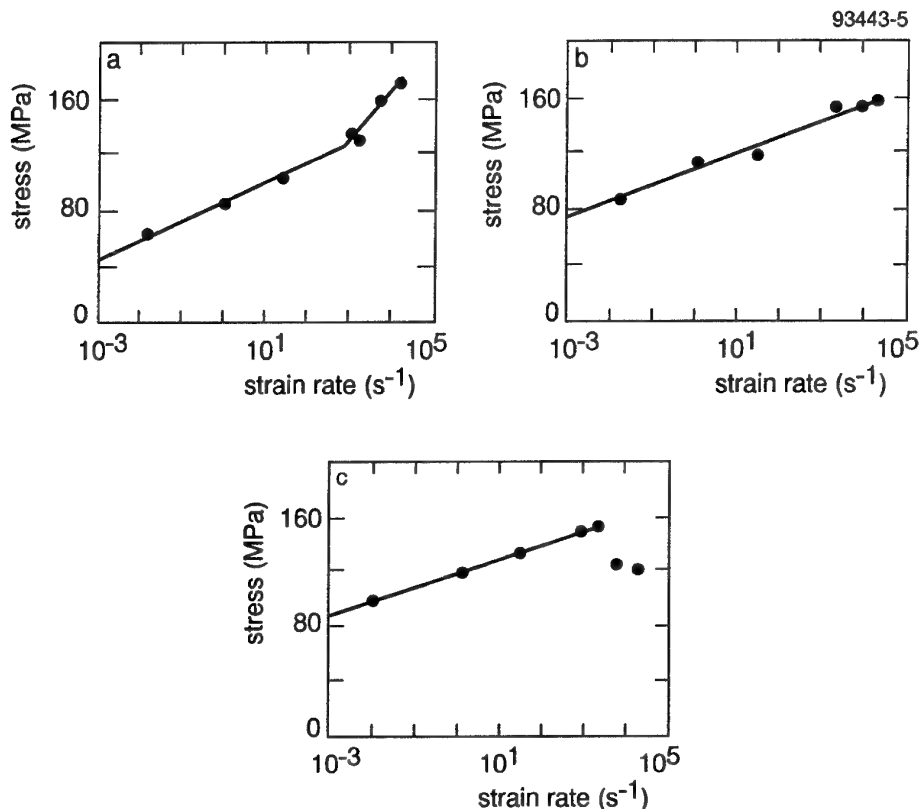
In verhouding tot metalen en keramieken hebben kunststoffen een lage sterkte en een lage stijfheid. De meeste kunststoffen hebben treksterktes tussen 15 en 80 MPa; de E-modulus ligt in de range van 10^2 -10 GPa. Daar staat tegenover dat ze een grote (elastische) vervormbaarheid hebben en dat hun dichtheid lager is. Sommige kunststoffen kunnen rekken tot maar liefst 1000% ondergaan voordat ze breken. De dichtheid ligt in de orde van $1 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$ (zie bijvoorbeeld [1] voor een tabel met gegevens over een aantal kunststoffen).

Het is bekend dat de mechanische eigenschappen van kunststoffen sterk afhankelijk zijn van de reksnelheid. Zowel de sterkte als de elasticiteitsmodulus nemen toe met de reksnelheid [25]. In [25] wordt voor een drietal kunststoffen, namelijk HDPE (hoge dichtheid-polyethyleen), UHMWPE (ultra-hoge moleculaire massa polyethyleen) en Nylatron GS (een gemodificeerd nylon 66) de invloed van de reksnelheid op het gedrag onder trek bestudeerd. Figuur 4 laat de resultaten zien.



Figuur 4: Spanning-rek curves als resultaat van quasi-statische proeven, SHPB-experimenten en expanderende ringmethode voor HDPE, UHMWPE en Nylatron [25].

Ook de druksterkte van polymeren is groter bij hoge reksnelheden dan bij lage reksnelheden. Walley en Field [26] hebben de reksnelheidsgevoeligheid van vele polymeren onderzocht in het gebied van 10^{-3} tot 10^4 s⁻¹. Ondanks dat het gedrag van de diversen polymeren nogal verschillend was (afname in sterkte na maximale sterkte, ongeveer constant blijvende maximale sterkte of een continu toenemende sterkte), vertoonden ze allemaal een toename in sterkte met de reksnelheid. Bijna alle polymeren vertoonden een lineaire verhouding tussen sterkte en de logaritme van de reksnelheid. Enkele voorbeelden worden gegeven in figuur 5. Een aantal polymeren vertoonden vanaf reksnelheden van 10^3 s⁻¹ een verhoogde gevoeligheid, anderen een afnemende gevoeligheid en weer anderen een gelijkblijvende gevoeligheid.



Figuur 5: Maximale spanning als functie van de reksnelheid voor a) PVC; b) nylon 6; c) PEEK [26].

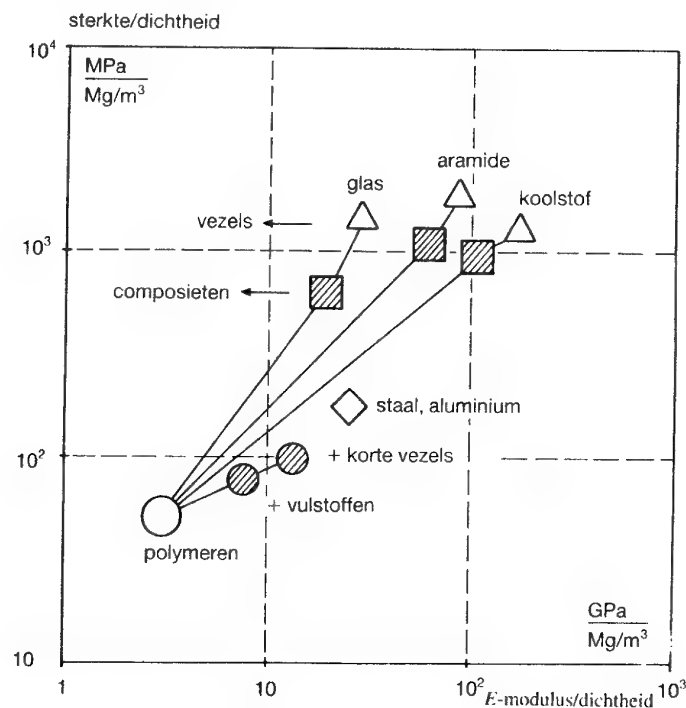
Vanwege de geringe sterkte en stijfheid kunnen kunststoffen op schokgolfbestendigheid niet concurreren met metalen. De combinatie van een goede slagvastheid, een groot elastisch deformatievermogen en een redelijke sterkte maakt een aantal kunststoffen wel geschikt om weerstand te bieden tegen kogels en fragmenten. Een bekend voorbeeld is polycarbonaat (kerfslagsterkte met Izod kerf = 2, rek bij breuk > 110%, treksterkte = 65 MPa), dat wordt gebruikt voor kogelvrij glas.

Een ander mogelijk veelbelovend materiaal is het Carilon polymeer, een polymeer van etheen en koolmonoxyde dat binnenkort door Shell op de markt zal worden gebracht [27]. Shell beweert dat het een slagvastheid heeft dat vergelijkbaar is met dat van polycarbonaat.

4.2 Vezelversterkte kunststoffen

De lage sterkte en stijfheid van kunststoffen kunnen verbeterd worden door ze te versterken met vezels. Veel gebruikte vezelmateriaal zijn glas, koolstof en aramide (zoals Kevlar en Twaron). Als matrix-materialen kunnen zowel thermoharders

Vezelversterkte kunststoffen kunnen in vele verschillende verschijningsvormen voorkomen. De kunststoffen kunnen versterkt zijn met korte of met continue vezels. De korte vezels kunnen in willekeurige richting liggen of in één specifieke richting. Continue vezels kunnen in één of meerdere richtingen liggen, waarbij deze nog door weefsels (2D of 3D) met elkaar verbonden kunnen zijn. Het meeste effect op de sterkte en stijfheidseigenschappen hebben continue vezels, zoals figuur 6 laat zien. Op basis van massa zien we een toenemende sterkte en stijfheid in de reeks: polymeren - polymeren met korte vezels - polymeren met continue vezels. Op basis van massa is de sterkte en stijfheid van polymeren met continue vezels zelfs veel beter dan die van metalen, waarbij echter wel opgemerkt moet worden dat de gegevens voor de categorie polymeren met continue wapening gelden voor systemen met vezels in één richting.



Figuur 6: Sterkte en stijfheid van enkele materialen op basis van massa [28].

De bulk van vezelversterkte kunststoffen zijn laminaten, waarbij iedere laag zijn eigen vezelrichting heeft. Pas recent wordt meer aandacht gericht op diverse weefsels en weefseltechnieken. Door de manier van opleggen van de diverse lagen kunnen produkten met meer of minder quasi-isotropische eigenschappen verkregen worden. Met vezels slechts in één richting is het duidelijk dat het materiaal de hoogste sterkte en stijfheid heeft in de richting parallel aan de vezels en de laagste in de richting loodrecht op de vezels. Met vezels in meerdere richtingen zijn de verschillen in eigenschappen in diverse richtingen kleiner.

In deze composieten zijn het de vezels die de dragende functie uitoefenen, terwijl de kunststof matrix een afdichtende en voor de samenhang en spanningsoverdracht functionerende rol vervult. Het zijn dus met name de sterkte en stijfheid van het vezelmateriaal die de sterkte en stijfheid van het composiet bepalen. Voor een aantal vezelmaterialen worden de sterkte, stijfheid en vervormbaarheid gegeven in tabel 5. In het algemeen hebben de glasvezels en koolstofvezels de grootste sterkte, de koolstofvezels de grootste stijfheid en de aramidevezels de grootste vervormbaarheid. De ene vezel van een bepaald type kan echter nog aanzienlijk andere eigenschappen hebben dan een andere vezel van hetzelfde type. Zoals uit tabel 5 blijkt kunnen de eigenschappen van diverse koolstofvezels aanzienlijk uit elkaar liggen.

Tabel 5: Eigenschappen van vezelmaterialen.

Vezelmateriaal	Fabrikant	Treksterkte [MPa]	E-modulus [GPa]	Max. rek [%]	Dichtheid [kg/m ³]	Bron
Glas						
E-glas	Vetrotex	3448	73		2600	[33]
R-glas		4400	86		2530	[33]
S-2 glas		4563	87		2490	[33]
RH-glas		4700	90		2490	[33]
Koolstof						
GY70	BASF	1860	517	0.36	1960	[29], [30]
M55J 6K	Toray	3920	540	0.7	1930	[29], [30]
M60J 3K	Toray	3800	588	0.7	1940	[30]
K-1392U 2K	Mitsubishi	3620	760	0.52	2160	[30]
XN-70A 2K	Nippon Oil	3630	720	0.5	2160	[30]
FT-700 2K	Tonen	3300	700	0.54	2160	[30]
P-75S 2K	Amoco	1897	517	0.4	2080	[30]
G30-500 6K	BASF	4080	234	1.74	1770	[31]
G40-800 12K	BASF	5670	292	1.95	1830	[31]
IM7 12K	Hercules	4820	283	1.64	1790	[31]
Apollo 12 K	Courtaulds	5280	297	1.77	1740	[31]
T300 6K	Toray	3720	237	1.57	1780	[31]
T800 12K	Toray	5650	295	1.81	1810	[31]
Aramide						
Kevlar K29	Dupont	2650	58.9	4	1440	[32]
Kevlar K49	Dupont	2650	127.5	2.1	1450	[32]

In tabel 6 worden de eigenschappen van een aantal vezelversterkte kunststoffen gegeven. De mechanische eigenschappen van de composieten hangen van een aantal factoren af. Het belangrijkste zijn de eigenschappen van de vezels in het composiet en de hoeveelheid.

Uit het werk van Hermann e.a [31] (materialen 7a t/m f in tabel 6) blijkt duidelijk de dragende functie van de vezelmaterialen. Een zestal vezelversterkte kunststoffen, met allemaal hetzelfde matrixmateriaal maar verschillende koolstofvezels, worden met elkaar vergeleken. De treksterkte en stijfheid van de composieten liggen in de orde van die van de vezels (zie tabel 5). Het hars heeft een veel lagere sterkte en stijfheid (treksterkte: 57 MPa, E-modulus: 3.6 GPa). De rangorde van de koolstofvezels in sterkte en stijfheid komt ook ongeveer terug in de composieten.

Uit de resultaten van trekproeven door 't Hart e.a. [35] (materialen 3a t/m 3g) op diverse vezelversterkte kunststoffen zien we dat materialen met dezelfde vezels maar een andere matrix ongeveer dezelfde sterkte hebben. Hieruit blijkt wederom de dominantie van het vezelmateriaal ten aanzien van de sterkte van de composiet. Dit wil niet zeggen dat het matrixmateriaal niet belangrijk is. Het materiaal van de matrix heeft slechts een geringe invloed op de sterkte- en stijfheidseigenschappen, maar in de richting loodrecht op de vezels zijn de matrixeigenschappen nog steeds van belang. Ook voor de vervormbaarheid van het materiaal is de matrix van belang. Het is bijvoorbeeld niet zinvol om een vezel met een grote rek toe te passen in een matrix die slechts een beperkte rek kan opnemen. De vervormbaarheid wordt dan begrensd door die van de matrix.

Het belang van de lay-up en de richting van de vezels ten opzichte van de trekrichting is duidelijk aangetoond door Daniel ([39], [40] en [41]; materialen 10, 11 en 12). Naar mate de hoek tussen trekrichting en vezels groter wordt nemen de sterkte en de stijfheid af. Ook werd duidelijk dat de configuratie $[\pm\theta]_{2s}$ beter is dan $[\theta]_s$ ondanks dat de hoek tussen vezels en trekrichting gelijk is. Zowel de sterkte als de stijfheid als de rek zijn groter.

Tabel 6: Eigenschappen van een aantal vezelversterkte kunststoffen.

	Matrix-materiaal / Fabrikant	Vezel-materiaal	Lay-up	Treksterkte [MPa]	Stijfheid [GPa]	Rek	Bron
	Epoxy	Koolstof					
1a	Ciba Geigy LY556/ HY917/DY070	Tenax HTA	$[0_6]$	1817			[34]
1b	idem	idem	$[90/0/0/0/0/0/90]$	1305			[34]
1c	idem	idem	$[0/90/0/90/0]$	1378			[34]
2a	Ciba Geigy LY556/ HY917/DY070	Torayca T700	$[0_5]$	2222			[34]
2b	idem	idem	$[0_4]$	2022			[34]
2c	idem	idem	$[0/90/0/90/0]$	1542			[34]
3a	5245 BASF*	T800	$[0_s]$	1920			[35]
3b	924 Ciba*	T800	$[0_s]$	2170			[35]
3c	6376 Ciba*	T800	$[0_s]$	2070			[35]
3d	6376 Ciba*	T400	$[0_s]$	1860			[35]
3e	6376 Ciba*	HTA7	$[0_s]$	2170			[35]
3f	982 ICI*	HTA7	$[0_s]$	1990			[35]
3g	5245 BASF*	IM400	$[0_s]$	2250			[35]
4	Ciba 914	M55J	quasi-isotroop	478	110		[36]
5a	M18 Ciba/Brochier*	M55J, 60 vol%	$[0_s]$	1784	301	0.57	[29]
5b	idem	idem	$[90_s]$	21	5.9	0.36	[29]
5c	idem	idem	$[60^\circ, 0^\circ, -60^\circ]_{2s}$	695	109	0.61	[29]
6a	Epoxy 934, ICI- Fiberite*	FT-700, 60 v%	$[0_s]$	1487	373		[30]
6b	idem	K1392U, 60 v%	$[0_s]$	1715	459		[30]
6c	idem	XN-70 A, 60 v%	$[0_s]$	1035	412		[30]

Tabel 6: Vervolg.

	Matrix-materiaal / Fabrikant	Vezel-materiaal	Lay-up	Treksterkte [MPa]	Stijfheid [GPa]	Rek	Bron
	Epoxy	Koolstof					
7a	Rigidite®5245C- hars, BASF	G40-800, 63.7 vol%	[0 _s]	2830	171	1.6	[31]
7b	idem	G30-500, 63.8 vol%	[0 _s]	2190	144	1.3	[31]
7c	idem	IM7, 61.1 vol%	[0 _s]	2770	168	1.6	[31]
7d	idem	Apollo, 61.6 v%	[0 _s]	2450	180	1.3	[31]
7e	idem	T800, 63 vol%	[0 _s]	2850	181	1.6	[31]
7f	idem	T300, 62.9 v%	[0 _s]	2190	143	1.5	[31]
8a	934	P75	[0/+38/-38/90] _{2s}	317	110	0.3	[38]
8b	idem	idem	[0/+45/-45/90] _{2s}	272	-	-	[38]
8c	idem	idem	[±46/0/90] _s	188	-	-	[38]
9	E-788	T-300	[0/±45/0] _s	872			[42]
10a	PR288, 3M*	T300	[0 _s]	1656	145	1.13	[39]
10b	idem	idem	[90 _s]	71	11.4	0.66	[39]
11a	PR288, 3M*	AS	[0 _s]	1518	137	1.08	[39]
11b	idem	idem	[90 _s]	64	10.4	0.66	[39]
11c	idem	idem	[22.5 _g]	218	34.6	1.1	[40]
11d	idem	idem	[30 _g]	149	25.4	0.8	[40]
11e	idem	idem	[45 _g]	90	14.7	0.7	[40]
11f	idem	idem	[0 _g]	1458	135	1.06	[41]
11g	idem	idem	[±15] _{2s}	823	104.5	0.78	[41]
11h	idem	idem	[±22.5] _{2s}	773	81.4	1.03	[41]
11i	idem	idem	[±30] _{2s}	566	58.6	1.32	[41]
11j	idem	idem	[±45] _{2s}	>224	20.4	>3.05	[41]
11k	idem	idem	[±60] _{2s}	105	14.0	1.16	[41]
11l	idem	idem	[±67] _{2s}	85.1	12.0	0.81	[41]
11m	idem	idem	[±75] _{2s}	74.8	12.1	0.75	[41]
11n	idem	idem	[90 _g]	52	10.3	0.52	[41]
	Epoxy	Koolstof + glas					
12a	PR288, 3M*	80AS + 20S	[0 _s]	1290	107	1.16	[39]
12b	idem	idem	[90 _s]	42	11.5	0.39	[39]
12c	idem	idem	[22.5 _g]	204	38.6	0.77	[40]
12d	idem	idem	[30 _g]	157	24.7	0.97	[40]
12e	idem	idem	[45 _g]	100	15.4	0.8	[40]
12f	idem	idem	[0 _g]	1240	107	1.14	[41]
12g	idem	idem	[±15] _{2s}	806	94.5	0.84	[41]
12h	idem	idem	[±22.5] _{2s}	653	68.5	1.04	[41]
12i	idem	idem	[±30] _{2s}	503	44.9	1.39	[41]
12j	idem	idem	[±45] _{2s}	>191	21.5	>2.65	[41]
12k	idem	idem	[±60] _{2s}	94.8	18.2	0.85	[41]
12l	idem	idem	[±67] _{2s}	76.1	14.4	0.62	[41]
12m	idem	idem	[±75] _{2s}	61.4	15.5	0.47	[41]
12n	idem	idem	[0 _g]	49	11.8	0.45	[41]

Tabel 6: Vervolg.

	Matrix-materiaal / Fabrikant	Vezel-materiaal	Lay-up	Treksterkte [MPa]	Stijfheid [GPa]	Rek	Bron
13	Polyester CYCOM TM 4102 polyester	Glas RH-glas	[0/45/+45/90/0/ 90/+45/-45/0]	289.6	24.1		[33]
	Thermoharder	Koolstof					
14a	PEEK, ICI-Fiberite*	koolstof AS4	[0] _s	1200	130		[37]
14b	AvidmidK	koolstof IM6	[0] _s	1200			[37]
	Epoxy	Aramide					
15a	F-185	Kevlar-49 fabric (281)	[0/45/0] _s	396			[42]
15b	LRF-277	Kevlar-49 fabric (120)	[0/90/±45] _s	577			[42]
15c	CE-306	Kevlar-49 fabric (281)	[0/90] _s	421			[42]

* Fabrikant van matrix-materiaal is tevens fabrikant van prepreg-materiaal.

Commerciële namen: 5. VICOTEX SXTHM M18/M55J; 6a. HyE FT 700/34C; 6b. HyE 4934C; 6c. HyE 5034D;
10. SP288T300; 11. SP288/AS; 12. 80As/20S/PR288; 14a. APC2

Het onderling vergelijken van de materialen in tabel 6 om tot een optimale combinatie te komen is niet haalbaar. Daarvoor zijn de materialen te verschillend en wordt soms te weinig informatie gegeven, zoals het ontbreken van de hoeveelheid vezels in een composiet.

Een vergelijking tussen een met koolstofvezel en een met glasvezel versterkt epoxy wordt gedaan door Li e.a. in [44]. De sterkte, stijfheid en vervorming van een vijftal laminaten worden vergeleken, waarbij de laminaten bestaan uit geweeftde koolstof- en geweeftde glasvezels in verschillende samenstellingen: alleen laminaten met glasvezels, alleen koolstofvezels en beide in verschillende verhoudingen. Het bleek dat de treksterkte en de E-modulus onder trek toenemen met een toenemend gewichtspercentage aan koolstof-wapening, terwijl de rek tot breuk aanzienlijk afneemt ten opzichte van het laminaat met alleen maar glasvezels. Onder trekbelasting bleek de combinatie van sterkte en rek tot breuk optimaal bij een gewichtspercentage van 70% aan koolstofwapening.

Ook voor de interlaminaire afschuifsterkte hebben de drie combinaties dezelfde rangorde (Li e.a. [45]). De interlaminaire afschuifsterkte is het hoogst tussen twee lagen met geweeftde koolstofvezels en het laagst tussen twee lagen met geweeftde glasvezels. De interlaminaire afschuifsterkte tussen een laag met koolstofvezels en een laag met glasvezels ligt tussen beide in.

Het dynamisch gedrag van vezelversterkte kunststoffen is onder andere onderzocht door Daniel ([39], [40] en [41]) met behulp van de 'expanding ring'-methode. Koolstof-epoxy composieten en koolstof/glas/epoxy composieten zijn getest onder drie verschillende reksnelheden, een quasi-statische, een middelmatige en een hoge reksnelheid. Unidirectionele kunststoffen zijn onder verschillende hoeken getest.

In longitudinale richting (parallel met de vezels) variëren de eigenschappen weinig met de reksnelheid. Slechts een geringe toename (maximaal 20%) in E-modulus is waargenomen. In transversale richting (loodrecht op de vezels) vertoonden de kunststoffen wel een grote rekgevoeligheid. Er zijn toenames in sterkte en modulus tot een factor van drie ten opzichte van de statische waarde waargenomen. In beide situaties varieerde de maximale rek nauwelijks met de reksnelheid. De inplane afschuif-modulus en afschuifsterkte namen behoorlijk toe met de reksnelheid tot percentages van 65%.

Met de vezels onder een hoek werd een reksnelheidsgevoeligheid geconstateerd die tussen de gevoeligheid van de longitudinale richting en de transversale richting in lag. Een toename van respectievelijk ongeveer 100%, 150% en 200% in sterkte en modulus werd geconstateerd voor composieten met een lay-up van respectievelijk [22.5_g] [30_g] en [45_g]. Voor de maximale rek is wederom geen gevoeligheid voor de reksnelheid waargenomen.

Behalve unidirectionele composieten zijn er ook composieten met de volgende lay-ups getests: [± 15]_{2s}, [± 22.5]_{2s}, [± 30]_{2s}, [± 45]_{2s}, [± 60]_{2s}, [± 67.5]_{2s}, en [± 75]_{2s}. In al deze laminaten namen de sterkte en modulus toe met de reksnelheid. De gevoeligheid voor de reksnelheid was wel verschillend voor ieder lay-up. De [± 75]_{2s}-lay-up vertoonde de grootste gevoeligheid voor de reksnelheid met toenames in sterkte en stijfheid tot 200 à 275% ten opzichte van de statische waarde. De [± 15]_{2s}-lay-up vertoonde de kleinste gevoeligheid met toenames in sterkte en stijfheid van 10 à 25% ten opzichte van de statische waarde.

Bragov en Lomunov [43] hebben de rekgevoeligheid (reksnelheid van 10^3 s^{-1}) onder druk van een met glasvezel versterkt epoxy onderzocht in een drietal configuraties: een unidirectionele configuratie, een cross-ply configuratie (vezels afwisselend in 0° en 90°-richting) en een quasi-isotropische configuratie (opvolgende lagen met vezels in richting 0°, +45°, 90° en -45°). Alle drie de configuraties hadden een hogere sterkte en stijfheid onder een hoge reksnelheid. Li e.a. [44] hebben het effect van de reksnelheid op een vijftal vezelversterkte composieten onder zowel trek als druk onderzocht. De vijftal vezelversterkte composieten waren geweeftde laminaten: een grof geweeft koolstof/epoxy, een fijn geweeft glas/epoxy en drie verschillende hybride lay-ups van geweeftde koolstof/epoxy laminaten en geweeftde glas/epoxy laminaten. Voor alle vijf laminaten nam de treksterkte toe met de reksnelheid. Voor de maximale rek werd alleen voor het glas/epoxy-materiaal een toename geconstateerd. Onder druk vertoonden alle laminaten een behoorlijke toename in zowel sterkte als maximale rek.

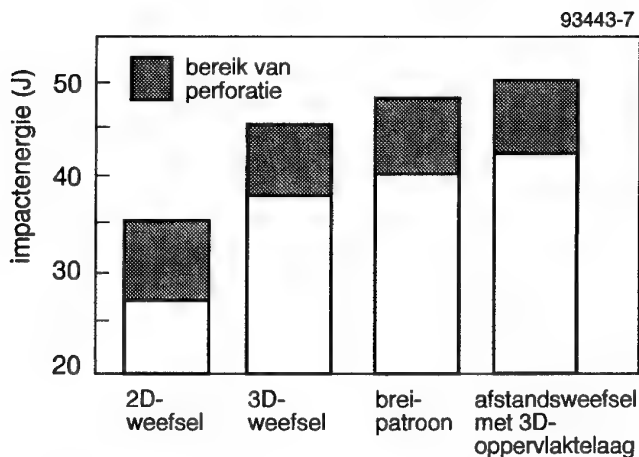
Li e.a. ([44] en [45]) hebben ook dynamische interlaminaire afschuifproeven uitgevoerd tussen de diverse geweeftde lagen, tussen twee lagen met koolstofvezels, tussen twee lagen met glasvezels en tussen een laag met glasvezels en een laag met koolstofvezels. In alle gevallen was de belasting bij interlaminair falen significant hoger onder impact dan statisch.

Uit deze onderzoeken blijkt duidelijk de grote gevoeligheid voor de reksnelheid van vezelversterkte kunststoffen. De gevoeligheid wordt met name bepaald door het matrixmateriaal, gezien de resultaten van Daniel ([39], [40] en [41]). Dat is ook

geconstateerd in [49] voor de afschuifsterkte. De gevoeligheid voor de reksnelheid betreft voornamelijk de sterkte en stijfheid en niet de rek.

De ballistische weerstand van vezelversterkte kunststoffen wordt met name geleverd door de vezels. Uit experimenten van Van Riet [32] blijkt dat de invloed van het matrix-materiaal op de ballistische weerstand gering is.

Gunstig voor een goede ballistische weerstand is een vezelmateriaal met een hoge breukrek en een fijn weefsel. Een hoge sterkte en stijfheid zijn minder van belang. Zowel in [46] als in [47] wordt dit geconstateerd. In [46] worden bijvoorbeeld een Kevlar 29 en een Arenka D1000 weefsel vergeleken op hun ballistische beschermingsvermogen. Er is slechts een gering verschil in beider V_{50} -waarden (= snelheid waarbij projectiel nog net wordt gestopt) voor hardstalen projectielen. In geval van vervormbare projectielen is er echter wel verschil in ballistische weerstand. Het Kevlar-weefsel deed de projectielen eerder deformeren waardoor ze eerder stopten. Deze betere ballistische weerstand is deels te danken aan de grotere breukrek, waardoor de energie-absorptie groter was. De hogere sterkte van het Arenka bood het daarentegen geen voordeel. Ook het fijnere weefsel van het Kevlar met 30% meer draadkruisingen droeg bij aan de hogere energie-absorptie. In [47] worden de energie-opnamevermogens van koolstof-, glas en aramidevezels vergeleken. Hierbij kwamen de aramidevezels met hun grote breukrek als beste uit de bus en de koolstofvezels met hun hoge stijfheid en sterkte als slechtste. Ook worden in [47] diverse weefsel vergeleken. In figuur 7 worden een viertal weefsels op perforatie-energie vergeleken met de oppervlakte-dichtheid als vaste maat. Verrassende verbetering in ballistische weerstand wordt verkregen met de vezels in een breipatroon. De weerstand is vergelijkbaar met die van 3D-weefsels.



Figuur 7: Vergelijking van energie nodig om diverse weefsels met dezelfde oppervlakte-dichtheid te perforeren [47].

Per gewichtseenheid hebben de vezelversterkte kunststoffen een beter ballistisch beschermingsvermogen dan staal [32]. Dit is waargenomen voor dunne panelen. Of dit voordeel ook voor dikke panelen doorgetrokken mag worden is niet onderzocht.

Bij trefsnelheden hoger dan de limietsnelheid blijkt staal weer een betere ballistische weerstand te bieden. De perforatiesnelheden zijn lager bij staal. Dit is het gevolg van projectiel deformatie die optreedt bij inslag op staalplaat bij hoge trefsnelheden. Bij het kunststof treedt geen projectiel deformatie op. Nadeel van kunststoffen is delaminatie. Door interlaminaire schade neemt de sterkte van het materiaal aanzienlijk af. De invloed van delaminatie op de penetratieweerstand is niet groot, maar het levert in zijn totaliteit wel een aanzienlijke verzwakking voor de constructie op.

De interlaminaire schade is geringer bij stoffen met vezels met een lagere sterkte en stijfheid. Lokaal wordt veel energie opgenomen door het breken van de vezels [31]. Een met Kevlar versterkt kunststof vertoont een geringere neiging tot delamineren dan een met satijn weefsel versterkt kunststof [32].

Het matrixmateriaal heeft ook een aanzienlijke invloed op de mate van delaminatie. Thermoplasten hebben veel minder de neiging om te delamineren dan thermoharders ([47] en [51]). Ook Srinivasan en Tiwari [48] constateerden dat de matrix een belangrijke invloed heeft op de schade na impact. De volgende rangorde in afnemende hoeveelheid delaminatieschade werd gevonden voor een zestal koolstofvezelversterkte kunststoffen: 3501-6/AS-4, PEEK/IM-7, PEEK/AS-4, 977-2/IM-7, T3900-2/T800-H en ULTEM1000/AS-4. Het slechtst presteert het 3501-6 dat een bros epoxy (thermoharder) is. De schade in de beide PEEK-materialen is ongeveer gelijk ondanks totaal verschillende koolstofvezels. Dit duidt op de dominantie van het matrix-materiaal wat betreft de delaminatie-schade. 977-2 en T3900-2 zijn taaie thermoharders. ULTEM tenslotte is een amorf polyimide (een thermoplast) en vertoont de minste delaminatie. Blijkbaar is het de taaigheid van het matrix-materiaal die invloed heeft op de delaminatie.

De ballistische weerstand van een viertal vezelversterkte fenol-systemen worden geëvalueerd in [24] met als doel een vezelversterkt pantsermateriaal te vinden dat bescherming biedt tegen een 60-grain (= 3.89 gram) FSP (fragment simulating projectile). Als vezelmateriaal werden beschouwd: Kevlar, E-glas, S2-glas en SpectraTM, welke laatste een polyetheen vezel is met uitstekende impacteigenschappen. Het met Spectra versterkte kunststof bood de gewenste bescherming bij een oppervlaktedichtheid van ca. 5 kg/m². Met Kevlar-vezels was een oppervlaktedichtheid van 10.3 kg/m² nodig en met S2-glas een oppervlakte-dichtheid van 12.2 kg/m². Het E-glas-systeem was niet getest omdat reeds bekend was dat het aanzienlijk slechter functioneert dan S2-glas.

Het Spectra-systeem voldoet dus het beste, maar is tevens de duurste optie. Met Kevlar versterkt kunststof is minder duur en het met S2-glas versterkte kunststof is op zijn beurt nog goedkoper.

Om een idee te geven van de ballistische weerstand van met vezels versterkt kunststof, worden in tabel 7 de V₅₀-waarden voor enkele types glasvezels in polyester (OCF E-701) gegeven zoals gevonden door Haskell [33].

Tabel 7: V₅₀ voor enkele glasvezelversterkte polyesters.

Vezeltype	FSP [grain/gram]	Oppervlakte- dichtheid [kg/m ²]	V ₅₀ -waarde [m/s]	Aantal schoten / spreiding
E-glas	207 / 13.4	57.6	757	2/12.8
R-glas	207 / 13.4	55.6	827	2/50.3
S-2-glas	207 / 13.4	58.1	985	2/27.4
SRT-glas	16 / 1.1	11.0	530	4/15.8
idem	44 / 2.85	27.6	792	2/37.8
idem	207 / 13.4	27.6	492	2/44.2
idem	207 / 13.4	60.8	1063	2/26.2

5 Composieten

De laatste categorie materialen die beschouwd worden zijn composieten die bestaan uit een combinatie van de materialen in de vorige hoofdstukken. Door de synergie tussen diverse materialen hebben dergelijke composieten vaak gunstige eigenschappen. Het aantal mogelijke combinaties is natuurlijk legio. Volstaan wordt met het geven van informatie over enkele van dergelijke composieten.

5.1 Pantsermaterialen

Pantsermaterialen bestaan in het algemeen uit een combinatie van een keramiek en aluminium en/of een kunststof. Voorbeelden zijn:

- Fokker Armour Panel: laminaat met de volgende lagen: Aluminiumfolie - Keramiek Al_2O_3 - Aluminiumfolie - 2 Aluminiumplaten - Twaron
Massa: 55 kg/m^2 en dikte: 23 mm.
De panelen bieden bescherming tegen Armour-Piercing ammunitie (7.62 mm NATO-AP met een snelheid van 825 m/s) en granaat fragmenten (207 grain/13.4 g fragmenten met een snelheid van 1040 m/s). Het paneel is getest op een 155 mm fragmentatie granaat op 25 m afstand.
- Twaron Armour plate (Fokker en Akzo): lagen van Twaron aramide in een matrix, bedekt met keramieken tegels.
Het paneel kan een 152 mm artillery shell, die explodeert op een afstand van 10 m weerstaan (ofwel een 60 grain fragment van ijzer met een snelheid van 778 m/s).
- Armourtek: glas-keramieke tegels gelijmd op een Aeroflex Kevlar composiet multi-ply laminaat.
Massa: 26.4 kg/m^2 en dikte: 14.5 mm.
Wapens die door Armourtek worden gestopt:
SLR/FN-kogel (7.62 x 51 mm), snelheid: 810 m/s.
AK47/AKM, Semi Armour Piercing (7.62 x 39 mm), snelheid: 680 m/s
AK47/AKM-kogel (7.62 x 39 mm), snelheid: 710 m/s.
SLR/FN-kogel (7.62 x 39 mm), snelheid: 710 m/s.

De bovenstaande voorbeelden zijn gegeven om een beeld te schetsen van wat pantsermaterialen aan bescherming kunnen bieden. Voor toepassing in beschermingsconstructies in out-of-area operaties zijn de materialen echter duur. De pantsermaterialen vinden hun specifieke toepassing daar waar massa echt belangrijk is, zoals voor beschermende lagen op tanks en voertuigen.

5.2 Composieten van metaal en kunststof

Metalen en kunststoffen kunnen elkaar aanvullen in het beschermende vermogen. Metalen hebben een hoge ductiliteit en sterkte. Kunststoffen hebben een grote elasticiteit en schokabsorberend vermogen. Zo is waargenomen dat met een laagje polymethylmethacrylaat achter een metalen plaat de penetratie weerstand van het metaal behoorlijk verbeterd wordt [50] ten koste van slechts een geringe toename in gewicht. Op dezelfde wijze kan een dünnere laag metaal met een laag erachter van polymethylacrylaat dezelfde of zelfs een betere penetratieweerstand leveren dan de dükkere en dus zwaardere metalen plaat.

Composieten van metalen en kunststoffen die als commerciële produkten op de markt te koop zijn, zijn Hylite, ARALL en GLARE.

Hylite is een lichtgewicht laminaat van twee dünnne aluminium huidlagen met daartussen een kunststofkern van polypropreen [52]. Het is recentelijk door Hoogovens ontwikkeld. De gewichtsreductie op basis van buigstijfheid kan 65% ten opzichte van staal en 30% ten opzichte van aluminium bedragen. De treksterkte is uiteraard wel geringer dan van massief aluminium. Voor toepassingen kan gedacht worden aan auto- of vliegtuig-onderdelen.

ARALL en GLARE behoren tot de familie van de zogenaamde vezel-metaal-laminaten. Dit zijn materialen bestaande uit dünnne metalen lagen afgewisseld met lagen van vezels geïmpregneerd met een thermoplast of thermoharder. Deze materialen worden het meest toegepast in de vliegtuigen voor plaat-onderdelen.

ARALL is gebaseerd op aluminium en aramide/epoxy. Commercieel beschikbaar zijn ([53] en [54]):

- ARALL-1: 7475-T61 of 7075-T6 aluminium met SP-366 prepreg (= 50 gew.% aramide vezels in één richting in een AF-163-2 adhesief);
- ARALL-2: 2024-T3 aluminium met SP-366 prepreg;
- ARALL-3: 7475-T76 aluminium met SP-366 prepreg;
- ARALL-4: 2024-T8 aluminium met SP-376 prepreg (aramidevezels in AF-191 adhesief).

GLARE is gebaseerd op aluminium en R-glass/epoxy. Commercieel beschikbaar zijn [54]:

- GLARE-1: 7475-T76 aluminium met unidirectioneel R-glas/epoxy;
- GLARE-2: 2024-T3 aluminium met unidirectioneel R-glas/epoxy;
- GLARE-3: 2024-T3 aluminium met cross-ply R-glas/epoxy;
- GLARE-4: 2024-T3 aluminium met cross-ply/UD R-glas/epoxy.

In [53] wordt verslag gedaan van trekproeven op ARALL-4 in een tweetal configuraties, een 3/2 (3 lagen aluminium, 2 lagen aramide prepreg) en een 5/4 configuratie. De sterktes die gevonden zijn worden gegeven in tabel 8.

Tabel 8: *Eigenschappen onder trek van ARALL-4 [53].*

	Vloeigrens [MPa]		Treksterkte [MPa]		E-modulus [GPa]	
	//	⊥	//	⊥	//	⊥
3/2 configuratie	447	304	820	335	70	50
5/4 configuratie	414	294	800	315	70	50

Gunstige eigenschappen van ARALL zijn [53]:

- uitstekende weerstand tegen vermoeiing vergeleken met aluminium;
- 15-20% lager dichtheid dan aluminium;
- 60% hogere longitudinale sterkte dan aluminium;
- goede dempingskarakteristiek;
- langer bruikbaar dan koolstof/epoxy composieten, aluminium vormt barriere voor vocht absorptie;
- goedkoper dan koolstof/epoxy composieten.

De ballistische weerstand van ARALL is niet hoog [53]. De limietsnelheid voor een 17 grain (=1.1 g) fragment simulator van staal, .22 Caliber-Army type G2, is 193 m/s voor een plaat van ARALL-4 met een dikte van 2.4 mm en een oppervlaktedichtheid van 5.34 kg/m². En de limietsnelheid voor een 17 grain (=1.1 g) loden .22 Caliber, hol en vlak, is 280 m/s voor een plaat van ARALL-4 met een dikte van 2.4 mm en een oppervlaktedichtheid van 5.34 kg/m². Deze ballistische weerstand is vergelijkbaar met die van Al 2024.

Meer informatie over de ballistische weerstand van deze commerciële composieten is niet gevonden. Een algemene conclusie mag niet gebaseerd worden op deze beperkte experimenten.

6 Conclusies

In dit rapport worden de eigenschappen gegeven van een aantal materialen, zoals die gevonden zijn in de literatuur. Deze eigenschappen betreffen karakteristieken die relevant zijn voor het bieden van bescherming tegen schokgolven en ballistische dreiging. Eigenschappen die gunstig zijn in dit verband worden opgesomd in hoofdstuk 1.

De beschouwde materialen zijn ingedeeld in een viertal categorieën:

- lichte metalen;
- keramieken;
- kunststoffen;
- composieten.

Materialen in iedere categorie vertonen een soortgelijk gedrag. Binnen iedere categorie zijn enorm veel verschillende materialen of combinaties van materialen. Het is daarom niet mogelijk om een compleet overzicht te geven. Het literatuuronderzoek geeft wel inzicht in de gunstige en ongunstige eigenschappen van de materialen van de vier categorieën.

Metalen zijn geschikt voor toepassing in beschermingsconstructies vanwege hun ductiliteit en redelijke sterkte en stijfheid. Met name staal wordt veel toegepast. Beschouwen we lichte metalen dan is aluminium het meest toegepast als constructiemateriaal. In de beschermingskunde wordt aluminium toegepast in pantsermaterialen. Er zijn geen voorbeelden gevonden van toepassingen van andere lichte metalen in de beschermingskunde.

Metaal-matrix-composieten zijn met deeltjes keramiek versterkte metalen. Deze MMC's hebben een hogere E-modulus, een hogere sterkte en een betere slijtageweerstand dan het basismetaal. MMC's hebben daarom een betere ballistische weerstand dan het onversterkte metaal. De ductiliteit is echter afgenomen ten opzichte van het basismetaal. Vanwege de verbeterde ballistische weerstand bestaat er vanuit de beschermingskunde belangstelling voor MMC's.

Keramieken bieden een goede ballistische weerstand dankzij een hoge hardheid en een grote stijfheid. Vanwege hun hoge brosheid en relatief lage treksterkte kunnen keramische materialen echter niet voor dragende constructie-onderdelen gebruikt worden en bieden ze geen bescherming tegen blast. Keramische materialen moeten dus in combinatie met metaal of kunststof toegepast worden. Zo worden ze ook toegepast in pantsermaterialen.

De grootste groep lichte materialen betreft de kunststoffen. Kunststoffen hebben een lage sterkte en lage stijfheid. Ze hebben daarentegen een groot elastisch vervormingsvermogen en sommigen hebben een goed schokabsorberend vermogen. De sterkte- en stijfheidseigenschappen van vezelversterkte kunststoffen zijn aanzienlijk beter. Kunststoffen met vezels in diverse richtingen (quasi-isotropisch) hebben sterktes en stijfheden van dezelfde orde als metalen. Kunststoffen met

vezels in één richting hebben in deze richting sterktes en stijfheden die die van metalen ver overschrijden. Per massa-eenheid hebben vezelversterkte kunststoffen een beter ballistisch beschermingsvermogen dan staal. De ballistische weerstand wordt met name door de vezels geleverd. Nadeel van vezelversterkte kunststoffen is delaminatie, waardoor sterkte en stijfheid aanzienlijk afnemen.

In composieten wordt gebruik gemaakt van de synergie tussen twee of meer materialen. Door twee of meerdere materialen te combineren kunnen constructie-elementen vervaardigd worden die meerdere gunstige eigenschappen in zich dragen (bijvoorbeeld zowel een goed dragend vermogen als een goede ballistische weerstand). De boven reeds genoemde MMC's en vezelversterkte kunststoffen zijn in principe ook composieten, maar worden al snel aangeduid met respectievelijk metalen en kunststoffen. Pantsermaterialen zijn een duidelijk voorbeeld van composieten. Pantsermaterialen bestaan in het algemeen uit een combinatie van keramiek en aluminium en/of (vezelversterkt) kunststof. De goede ballistische weerstand van keramieken wordt gecombineerd met het dragende vermogen van aluminium en/of vezelversterkt kunststof. Een andere mogelijkheid zijn laminaten van aluminium gecombineerd met een (vezelversterkt) kunststof. Hiervan zijn er diverse soorten op de commerciële markt verkrijgbaar. Ten opzichte van aluminium hebben dergelijke composieten per massa-eenheid een hogere buigsterkte en een goede dempingskarakteristiek. Indien het kunststof met vezels versterkt is is ook de sterkte in de richting van de vezels verbeterd ten opzichte van die van aluminium. Ten opzichte van het (vezelversterkte) kunststof zijn de barriere die het aluminium vormt tegen vocht opname, de hogere sterkte loodrecht op de vezelrichting en de lagere prijs verbeteringen. De geschiktheid of ongeschiktheid als ballistisch beschermingsmateriaal is voor dergelijke composieten nog niet voldoende bestudeerd. De enkele gegevens die gevonden zijn duiden op een ballistische weerstand die vergelijkbaar is met massief aluminium.

De pantsermaterialen bieden de beste bescherming tegen zowel blast als kogels en fragmenten. Dit is niet verbazingwekkend omdat de pantsermaterialen speciaal voor dit doel zijn ontworpen. De goede ballistische weerstand van keramieken wordt gecombineerd met de goede draagcapaciteit van aluminium of vezelversterkt kunststof. Het is echter de vraag of dit beschermingsniveau gewenst is. Aan deze goede bescherming hangt ook een prijskaartje.

In de andere materialen, die beschouwd zijn, is geen rangorde aan te brengen. Het ene materiaal is beter wat betreft ballistische bescherming, het andere heeft een beter dragend vermogen. Veelbelovend lijken de vezelversterkte kunststoffen die een redelijke ballistische weerstand combineren met een behoorlijke sterkte en stijfheid.

De geschiktheid van een materiaal hangt samen met de mate van bescherming die gewenst is en de overige eisen ten aanzien van de constructie. Diverse soorten constructies zijn mogelijk. Constructies kunnen variëren van snel monteerbare en demonteerbare constructies die direct bescherming bieden tegen alle type dreigingen tot dragende constructies, die aangevuld moeten worden met zand voor de

ballistische bescherming. Het vullen van zandzakken hiervoor is behoorlijk tijdrovend. Een tussenvorm zijn constructies gecombineerd met gewapende grond, waarbij de lichte materialen functioneren als grondkeer-element en/of wapening. Een inventarisatie van mogelijkheden met gewapende grond is uitgevoerd in opdracht van AWOO/DGW&T in project A93/D/430. Specifieke eisen zijn op dit moment niet gedefiniëerd. De behoeftestelling van de krijgsmacht wordt parallel aan dit onderzoek geïnventariseerd.

Omdat de materialen voor totaal andere toepassingen zijn ontwikkeld is over het dynamisch gedrag van sommige materialen nog weinig of niets bekend. Dit dynamisch gedrag is echter erg belangrijk voor de beschermingscapaciteit tegen een schokgolf. Ook de ballistische weerstand is niet altijd bekend.

Om in de toekomst snel in te kunnen spelen op concrete vragen naar ontwerpen voor lichte beschermingsconstructies wordt aanbevolen om een aantal veelbelovende materialen te testen onder een schokgolf en onder impact. Specifieke problemen van deze en soortgelijke materialen bij dergelijke belastingen kunnen dan aan het licht gebracht worden en bij een eventueel ontwerp kan daarmee rekening worden gehouden. Men kan bijvoorbeeld denken aan delaminatie van vezelversterkte kunststoffen. Onder een dynamische belasting zou dit eerder een probleem kunnen zijn of misschien juist niet.

Tevens wordt aanbevolen om te trachten de nieuwe ontwikkelingen op het gebied van materialen te blijven volgen. De onderzoeken op dit gebied zijn erop gericht steeds betere, sterkere en/of stijvere materialen te vinden. Aangezien dit eigenschappen zijn die de materialen van beschermingsconstructies ook moeten hebben is het niet onwaarschijnlijk dat er in de toekomst materialen ontwikkeld zullen worden die nog beter zijn voor toepassing in de beschermingskunde. Bovendien zullen de materialen die gebruikt worden ook steeds beter moeten zijn vanwege nieuwe ontwikkelingen op het gebied van de wapentechnologie.

Het opzetten van een soort databank zou een optie zijn om het overzicht over de diverse materialen te behouden en om in de toekomst snel een geschikt materiaal te vinden voor specifieke eisen.

In dit onderzoek is gekeken naar lichte materialen die in beschermingsconstructies zouden kunnen worden gebruikt. We willen er tenslotte nog op wijzen dat de constructieve aspecten minstens even belangrijk zijn. Keuze voor een erg sterk materiaal is zinloos als de verbindingselementen bijvoorbeeld veel zwakker zijn.

7 Referenties

- [1] Polytechnisch zakboekje,
ISBN 90-6228-087-0, 42e druk, Koninklijke PBNA BV, Arnhem 1987.
- [2] Teare, M.,
Manufacture of a multi-horn feed by electroforming,
Proceedings of the International Symposium on Advanced Materials for
Lightweight Structures '94, ESA-ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, 22-
25 March 1994, pp. 305-309.
- [3] Andrianopoulos, N.P. and Kourkoulis, S.K.,
A fracture mechanics approach in the construction of forming limit diagrams
in case of modern Al and Al-Li alloys and MMC's,
Proceedings of the International Symposium on Advanced Materials for
Lightweight Structures '94, ESA-ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, 22-
25 March 1994, pp. 207-212.
- [4] Hombergsmeier, E.,
Sheets and structures made from particulate reinforced aluminium matrix
composites,
Proceedings of the International Symposium on Advanced Materials for
Lightweight Structures '94, ESA-ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, 22-
25 March 1994, pp. 331-334.
- [5] Popov, N.N., Ivanov, A.G. and Morozov, S.A.,
Effect of strain rate on the resistance of titanium alloy VT16 to plastic de-
formation, 0039-2316/86/1808-1045, Plenum Publishing Corporation, 1987,
pp 1045-1048.
- [6] Takeda, N. and Kobayashi, A.,
High-Velocity Tensile Properties of Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn Alloys,
Shock-wave and high-strain-rate phenomena in materials, Edited by Marc A.
Meyers, Lawrence E. Murr and Karl P. Staudhammer.
- [7] Khorev, A.I.,
The russian titanium alloys, their properties and application fields,
Proceedings of the International Symposium on Advanced Materials for
Lightweight Structures '94, ESA-ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, 22-
25 March 1994, pp. 379-383.

- [8] Huthmann, H., Becker, P., Dietz, W., Gossmann, O. and Ramusat, G.,
Tensile, fracture toughness and fatigue crack growth behaviour of beryllium
S-200F at room temperature and elevated temperatures,
International symposium on advanced materials for lightweight structures
'94, Noordwijk, The Netherlands, 22-25 March 1994, pp. 265-271.
- [9] Winstone, M.R. and Kerry, S.,
The development of Ti₃Al intermetallic alloys for high temperature applica-
tions,
Proceedings of the International Symposium on Advanced Materials for
Lightweight Structures '94, ESA-ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, 22-
25 March 1994, pp. 287-291.
- [10] G.T. Gray,
Influence of shock loading on the structure/property response of Ti-48Al-
2Cr-2Nb and Ti-24Al-11Nb,
Euro-Dymat 94, International Conference on Mechanical and Physical Be-
haviour of Materials under Dynamic Loading, 26-30 September 1994, pp.
373-378.
- [11] Hasmi, M.S.J. and Haque, M.M.,
High strain rate properties of an aluminium alloy and high purity copper at
room temperature,
Proceedings of the International Symposium on 'Intense dynamic loading
and its effects, June 3-7, 1986, Beijing, China, Science Press, Beijing,
pp.637-648.
- [12] Fu, J.C., Labbe, C., Lataillade, J.L.,
Comparative study of the static and dynamic behaviours at high temperature
for the composite material (2124MMC) and its matrix (2124 alloy),
Proceedings on International Symposium on Advanced Materials for Light-
weight Structures '94, ESA-ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, 22-25
March 1994, pp. 603-608.
- [13] Limin Luo, Jian Jiang and Bradley Dodd,
The deformation mechanism and formability of a metal matrix composite --
Al-2124/SiC_p,
Proceedings of the International Symposium on Advanced Materials for
Lightweight Structures '94, ESA-ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, 22-
25 March 1994, pp. 311-315.

- [14] Vaziri, R., Delfosse, D., Pageau, G. and Poursartip, A.,
High-speed impact response of particulate metal matrix composite materials
- an experimental and theoretical investigation,
Int. J. Impact Engng, Vol 13, No. 2. pp. 329-352, 1993.
- [15] Vroomen, Ing. Dieter de,
Technische keramiek moet aan hoge eisen voldoen,
De Ingenieur nr. 11- 21 juni 1995, pp. 32-33.
- [16] Estrada, Elizabeth, Levallois, Franck and Jabs, Heinrich,
Silicon Carbide for highly stable Structures: Thermo-mechanical properties
and adhesive bonding characteristics,
Proceedings of the International Symposium on Advanced Materials for
Lightweight Structures '94, ESA-ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, 22-
25 March 1994, pp. 69-74.
- [17] Dandekar, D.P.,
Shear strengths of aluminium nitride and titanium diboride under plane
shock wave compression,
Euro-Dymat 94, International Conference on Mechanical and Physical Be-
haviour of Materials under Dynamic Loading, 26-30 September 1994, pp.
379-384.
- [18] Woodward, R.L., Gooch, W.A., Jr., O'Donnell, R.G., Perciballi, W.J.,
Baxter, B.J. and Pattie, S.D.,
A study of fragmentation in the ballistic impact of ceramics,
Int. J. Impact Engng Vol 15, No.5, pp 605-618, 1994.
- [19] Gilat, Anmos,
High Strain Rate Characterization of Ceramics in Shear,
Department of Engineering Mechanics, Department of the Navy, Office of
Naval Research, Virginia, Contract No. N00014-88-K-0733, June 1991.
- [20] Kobayashi, H. and Daimaruya, M.,
Dynamic and quasi-static lateral compression tests of ceramics tubes,
Euro-Dymat 94, International Conference on Mechanical and Physical Be-
haviour of Materials under Dynamic Loading, 26-30 September 1994, pp.
275-280.

- [21] Rodriguez, J., Navarro, C. and Sanchez-Galvez, V.,
Splitting tests: an alternative to determine the dynamic tensile strength of ceramic materials,
Euro-Dymat 94, International Conference on Mechanical and Physical Behaviour of Materials under Dynamic Loading, 26-30 September 1994, pp. 101-106.
- [22] Nahme, H., Hohler, V. and Stilp, A.,
Dynamic material properties and terminal ballistic behaviour of shock-loaded silicon-nitride ceramics,
Euro-Dymat 94, International Conference on Mechanical and Physical Behaviour of Materials under Dynamic Loading, 26-30 September 1994, pp. 237-242.
- [23] Ernst, H.J., Hoog, K. and Wiesner, V.,
Ballistic impact behaviour of some ceramics in different environments,
Euro-Dymat 94, International Conference on Mechanical and Physical Behaviour of Materials under Dynamic Loading, 26-30 September 1994, pp. 677-682.
- [24] Askins, D.R. and Kuhbander, R.J.,
Technical Support for Tactical Shelters,
WL-TR-91-4047, November 1991.
- [25] Al-Maliky, N. and Parry, D.J.,
Measurements of high strain rate properties of polymers using an expanding ring method,
Euro-Dymat 94, International Conference on Mechanical and Physical Behaviour of Materials under Dynamic Loading, 26-30 September 1994, pp. 71-76.
- [26] Walley, S.M. and Field, J.E.,
Strain Rate Sensitivity of Polymers in Compression from Low to High Rates,
Dymat Journal, Vol. 1, no. 3, September, 1994, pp. 211-227.
- [27] Evenblij, Maarten,
Dr. ir. A. Noordam: 'Carilon kan uitgroeien naar grote volumina',
Artikel in Technisch Weekblad nr. 17, 26 april 1995, pag. 2.
- [28] Schouten, Dr. A.E. en Vegt, Dr. ir. A.K. van der,
Plastics,
SBN 9066741988, Delta Press BV, Amerongen, Achtste Druk, 1987.

- [29] Fornari, Bruno, Dosio, Daniela and Romeo, Giulio,
Characterization of a state of the art UHM CFRP system for satellite application,
Proceedings on International Symposium on Advanced Materials for Lightweight Structures '94, ESA-ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, 22-25 March 1994, pp. 569-575.
- [30] Marzi, D., Marini, G. and Iobbi, P.,
Qualification of an Ultra High Modulus Carbon Fiber Prepreg for Space Applications,
Proceedings on International Symposium on Advanced Materials for Lightweight Structures '94, ESA-ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, 22-25 March 1994, pp. 597-602.
- [31] Herrmann, G., Vilsmeier, J.W. en Fischer, J.,
Einfluß der Verstärkungsfasern auf die Widerstandsfähigkeit von Verbundwerkstoffen gegen Schlagbeanspruchung,
DGLR-Bericht 91-04, Leichtbaustrukturen unter kruzzeitiger Beanspruchung (Impact, Crash), DGLR-symposium, 6-7 Juni 1991, Bremen, pp. 92-106.
- [32] Riet, E.J.M. van,
Kwetsbaarheid van scheepsconstructies voor scherven,
Evaluatie van pantsermaterialen II,
PML1981-21, Rijswijk, 1981.
- [33] Haskell, William E.,
High strength glass second source qualification to composite armor specification Mil-L-46197 (MR),
MTL TR 92-30, April 1992.
- [34] Verberne, C.J. and Larsen, S.S.,
Design strength data from multi-directional laminates,
Proceedings of the International Symposium on Advanced Materials for Lightweight Structures '94, ESA-ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, 22-25 March 1994, pp. 127-132.
- [35] 't Hart, W.G.J., Aoki, R., Bookholt, H., Curtis, P.T., Kröber, I., Marks, N. and Sigety, P.,
Garteur compression behaviour of advanced CFRP,
The Utilization of Advanced Composites in Military Air Craft, San Diego, California, 7-11 October 1991, pp 10.1-10.6.

- [36] Gergonne, B., Corberand, Ph., Berthelon, Th. and Schaeffler, Th.,
SILEX Optical Terminal Structure Overview of the Design and Stability Performances,
Proceedings of the International Symposium on Advanced Materials for
Lightweight Structures '94, ESA-ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, 22-
25 March 1994, pp. 57-62.
- [37] Dellus, Serge, Tretout, Herve and Rolland, Bruno,
Industrial mastering of advanced materials manufacturing technologies:
thermoplastic composites, SPFDB,
Proceedings of the International Symposium on Advanced Materials for
Lightweight Structures '94, ESA-ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, 22-
25 March 1994, pp. 331-334.
- [38] Schurr, J.N., Quin, M.T. and Hawkins, G.F.,
An investigation of the effect of low velocity impacts on P75/934 graphi-
te/epoxy composites,
Materials Sciences Laboratory, Aerospace Corp., El Segundo, CA. Lab. Ope-
rations, 1 April 1991.
- [39] Daniel, I.M.,
High strain rate properties of unidirectional composites, part I,
NASA Contractor Report 189083, IIT Research Institute, Chicago, Illinois,
December 1991.
- [40] Daniel, I.M.,
High strain rate properties of off-axis composite laminates, part II,
NASA Contractor Report 189084, IIT Research Institute, Chicago, Illinois,
December 1991.
- [41] Daniel, I.M.,
High strain rate properties of angle-ply composite laminates, part III,
NASA Contractor Report 189085, IIT Research Institute, Chicago, Illinois,
December 1991.
- [42] Baker, Donald J.,
Evaluation of composite components on the Bell 206L and Sikorsky S-76
helicopters,
Eighth DoD/NASA/FAA Conference on Fibrous Composites in Structural
Design.

- [43] Bragov, A.M. and Lomunov, A.K.,
Mechanical properties of some polymers and composites at strain rates of 1000/s,
Euro-Dymat 94, International Conference on Mechanical and Physical Behaviour of Materials under Dynamic Loading, 26-30 September 1994, pp. 337-342.
- [44] Li, Y.L., Harding, J. and Ruiz, C.,
Modelling of the impact response of fibre-reinforced composites,
Final report, February 1991.
- [45] Li, Y.L., Harding, J. and Taylor, M.E.C.,
The interlaminar shear strength of woven carbon, woven glass and woven carbon/glass hybrid laminates under static and impact loading.
- [46] Riet, E.J.M. van,
Onderzoek naar de ballistische weerstand van Kevlar 29 versus Arenka D1000 weefsel,
PML 1984-50, Rijswijk, 1984.
- [47] Brandt, J., Drechsler, K. and Arendts, F.J.,
Einsatz neuartiger textiler Faservorformlinge zur Verbesserung des Impact-verhaltens von Faserverbundstrukturen,
DGLR-Bericht 91-04, Leichtbaustrukturen unter kruzzeitiger Beanspruchung (Impact, Crash), DGLR-symposium, 6-7 Juni 1991, Bremen, pp. 1-17.
- [48] Srinivasan, K. and Tiwari, S.N.,
Impact response of composite materials,
NASA-CR-187898, February 1991.
- [49] Chiem, C.Y. and Liu, Z.G.,
Behaviour of the woven reinforced glass fiber - epoxy composite materials subjected to dynamic shear-loading,
Proceedings of the International Symposium on Intense Dynamic Loading and its Effects, June 3-7, 1986, Beijing, China, pp. 584-590.
- [50] Backman, Marvin E., Finnegan, Stephen A., Whitman, Kent G. and Sewell, Robert G.S.,
Armor penetration resistance enhancement,
United States Patent, Backman et al. Patent Number 4,885,994, Dec. 12, 1989.

- [51] Jegley, Dawn C.,
Compression behavior of graphite-epoxy and graphite-thermoplastic panels
with circular holes or impact damage,
Eight DoD/NASA /FAA Conference on Fibrous Composites in Structural
Design, Norfolk, Virginia, November 28-30, 1989, pp. 537-558.
- [52] Veenstra, Ir. E.W.,
Vervormen van lichtgewicht aluminium-kunststof-aluminium laminaat,
Materialen, november/december 1993, pp 16-18.
- [53] Donnellan, M.E., Cook, J. and Skowronek, C.,
Evaluation of ARALL-4: an aramid fiber reinforced aluminum,
Report no. NADC-89100-60, Warminster, sept. 1989.
- [54] Joosse, P.A., Nieuwenhuizen, M.P. and Guyt, C.B.,
Fibre metal laminates: physical properties and high temperature applications,
Proceedings of the International Symposium on Advanced Materials for
Lightweight Structures '94, ESA-ESTEC, Noordwijk, The Netherlands, 22-
25 March 1994, pp. 549-557.

8 Ondertekening

Rolf van Wees

Ir. R.M.M. van Wees
(Research-coordinator)

J.v.l. Doormaal

Ir. J.C.A.M. van Doormaal
(Projectleider/Auteur)

ONGERUBRICEERD

REPORT DOCUMENTATION PAGE

(MOD-NL)

1. DEFENCE REPORT NO. (MOD-NL) TD95-1024	2. RECIPIENT'S ACCESSION NO.	3. PERFORMING ORGANIZATION REPORT NO. PML 1995-A77			
4. PROJECT/TASK/WORK UNIT NO. 224493443	5. CONTRACT NO. A93/D/435	6. REPORT DATE July 1996			
7. NUMBER OF PAGES 44 (excl. RDP & distribution list)	8. NUMBER OF REFERENCES 54	9. TYPE OF REPORT AND DATES COVERED Final			
10. TITLE AND SUBTITLE Literatuurstudie naar lichte constructiematerialen voor toepassing in de beschermingskunde (Literature search of light construction materials for application in protective structures)					
11. AUTHOR(S) Ir. J.C.A.M. van Doormaal					
12. PERFORMING ORGANIZATION NAME(S) AND ADDRESS(ES) TNO Prins Maurits Laboratory, P.O. Box 45, 2280 AA Rijswijk, The Netherlands Lange Kleiweg 137, Rijswijk, The Netherlands					
13. SPONSORING AGENCY NAME(S) AND ADDRESS(ES) DGW&T/AWOO, P.O. Box 20701, 2500 ES Den Haag, The Netherlands					
14. SUPPLEMENTARY NOTES The classification designation Ongerubriceerd is equivalent to Unclassified.					
15. ABSTRACT (MAXIMUM 200 WORDS (1044 BYTE)) At the request of MoD/DGW&T (Infrastructural Department) a literature research has been carried out on light construction materials, which might be suitable for application in protective structures. Because of the out-of-area operations with which the armed force is occupied these days, there is interest in light materials because of transport. The characteristics of light metal, ceramics, plastics en composites are given. It is not possible to specify one material as the most suitable. Each material has its positive and negative characteristics. The appropriateness of a material depends on the specific demands, which are not specified. It is advised to keep following the developments in the field of light weight materials and to fill up gaps in the knowledge of the dynamic behaviour of promising materials by testing them under blast and impact. Furthermore it is advised not to focus only on the choice of a good material, but to pay also attention to the construction aspects, such as the connections.					
<table border="0" style="width: 100%;"><tr><td style="width: 33%; vertical-align: top;">16. DESCRIPTORS Literature study Mechanical properties Ballistic protection Composites Shock waves</td><td style="width: 33%; vertical-align: top;">IDENTIFIERS Metals Ceramics Armor Plastics Protection</td><td style="width: 33%; vertical-align: top;"> Protective structures Lightweight materials</td></tr></table>			16. DESCRIPTORS Literature study Mechanical properties Ballistic protection Composites Shock waves	IDENTIFIERS Metals Ceramics Armor Plastics Protection	 Protective structures Lightweight materials
16. DESCRIPTORS Literature study Mechanical properties Ballistic protection Composites Shock waves	IDENTIFIERS Metals Ceramics Armor Plastics Protection	 Protective structures Lightweight materials			
17a. SECURITY CLASSIFICATION (OF REPORT) Ongerubriceerd	17b. SECURITY CLASSIFICATION (OF PAGE) Ongerubriceerd	17c. SECURITY CLASSIFICATION (OF ABSTRACT) Ongerubriceerd			
18. DISTRIBUTION AVAILABILITY STATEMENT Unlimited Distribution		17d. SECURITY CLASSIFICATION (OF TITLES) Ongerubriceerd			

Distributielijst*

- 1*/2* DWOO
- 3 DWOO
- 4* HWO-KL
- 5* HWO-KLu
- 6* HWO-KM
- 7/11 DGW&T/CD/TB
Ir. D. Boon
- 12 KMA, vakgroep Militaire Logistieke Wetenschappen
Voorzitter
- 13/15 Bibliotheek KMA
- 16 Bureau TNO-DO
- 17* Lid Instituuts Advies Raad PML
Prof. B. Scarlett, M.Sc.
- 18* Lid Instituuts Advies Raad PML
Prof. ir. K.F. Wakker
- 19 TNO-PML, Directeur; daarna reserve
- 20 TNO-PML, Directeur Programma; daarna reserve
- 21 TNO-PML, Hoofd Divisie Munitietechnologie en Explosieveiligheid
Dr. D.W. Hoffmans
- 22/24 TNO-PML, Divisie Munitietechnologie en Explosieveiligheid
Ir. J. Weerheijm, Ir. R.M.M. van Wees en Ir. J.C.A.M. van Doormaal
- 25 TNO-PML, Documentatie
- 26 TNO-PML, Archief

* De met een asterisk (*) gemerkte instanties/personen ontvangen uitsluitend de titelpagina, het managementuittreksel, de documentatiepagina en de distributielijst van het rapport.